

Weiterbildender Fernstudiengang Umweltschutz

Leseprobe

Modul 1

Naturwissenschaftliche und technische Grundlagen

Peter Leinweber/Petra Kahle/ Peter Menning
Allgemeine Bodenkunde

Günter Schlungbaum/Uwe Selig
Allgemeine Gewässerkunde

Henning Baudler/Heidrun Böttcher
Klima- und Wetterkunde

Günter Schlungbaum
Biogeochemische Stoffkreisläufe

Hendrik Schubert
Struktur und Funktion von Ökosystemen

Kerstin Thurow/Norbert Stoll/Stefanie Hagemann
Umweltmesstechnik

Roland Matzmohr/Paul Engelke (Hg.)
Verfahrens- und Anlagentechnik (Reader)



ALLGEMEINE BODENKUNDE

PETER LEINWEBER
PETRA KAHLE
PETER MENNING

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Begriffsbestimmung	7
1.2	Studienaufgabe	8
2	Bodensubstrat	9
2.1	Begriff und Gliederung	9
2.2	Gesteine	9
2.3	Mineralbestand in Böden	11
2.4	Körnung	13
2.5	Bodensubstratcharakterisierung	15
3	Organische Bodensubstanzen	17
3.1	Definition und Klassifizierungen	17
3.1.1	Humusformen	18
3.1.2	Stoffliche Einteilungen der organischen Bodensubstanzen	19
3.1.3	Aktuelle Konzepte zur Struktur der Huminstoffe	20
3.2	Bildung und Umsetzung der organischen Bodensubstanzen	22
3.3	Organisch-mineralische Verbindungen und Partikel	25
3.4	Ökologische Wirkungen der organischen Bodensubstanzen	26
4	Stoffumsetzungen im Boden	31
4.1	Kationenaustausch	31
4.2	Anionensorption	34
4.3	Bodenreaktion und Pufferung	35
4.4	Redoxreaktionen	38
4.5	Nährstoffe im Boden	39
5	Gefüge und Porosität	45
6	Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt	49
6.1	Wasserhaushalt	49
6.2	Lufthaushalt	52
6.3	Wärmehaushalt	53

7	Bodenbildende Prozesse, Bodenhorizonte	55
8	Klassifikation und Eigenschaften wichtiger Böden	59
9	Aufbau und Kartierung der Bodendecke	67
10	Funktionen, Schutz und Belastung von Böden	69
10.1	Funktionen von Böden	69
10.2	Anthropogene Bodenveränderungen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung	72
10.2.1	Bodenüberformung und Versiegelung	72
10.2.2	Schutz vor Versiegelung	77
10.2.3	Bodenbearbeitung und Verdichtung	79
10.2.4	Schutz vor Bodenverdichtung	80
10.2.5	Bodenerosion	81
10.2.5.1	Erodierbarkeit des Bodens	82
10.2.5.2	Formen der Wassererosion	82
10.2.5.3	Winderosion	82
10.2.5.4	Vorkommen von Winderosion	83
10.2.5.5	Schutz vor Erosion	84
10.2.6	Be- und Entwässerung	84
10.2.7	Stoffliche Belastungen	85
10.2.7.1	Mineraldüngung und tierische Exkremente	85
10.2.7.2	Versauerung	88
10.2.7.3	Folgen der Versauerung	89
10.2.7.4	Kontamination des Bodens mit anorganischen und organischen Schadstoffen	90
10.2.7.5	Schutz vor Schwermetalleinträgen	94
10.3	Schutz und Sanierung von Böden	98
10.3.1	Gesetzliche Regelungen	98
10.3.1.1	Bodenschutz in der EU	99
10.3.1.2	Bodenschutz in Deutschland	99
10.3.1.3	Bundes-Bodenschutzgesetz	99
10.3.1.4	Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerte	100
10.3.2	Sicherung und Sanierung von Böden	100
10.3.2.1	Überblick	100
10.3.2.2	Sanierung nach Versauerung	103
10.3.2.3	Sanierung nach Belastung mit Schwermetallen	104
10.3.2.4	Sanierung nach Belastung mit Organika	104
10.3.2.5	Sanierung nach Belastung mit Salzen	104
10.3.2.6	Sanierung nach Belastung mit Radionukliden	104

Anlagenverzeichnis	105
Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	123
Stichwortverzeichnis	125

1 Einführung

1.1 Begriffsbestimmung

Der Boden ist die belebte oberste Lage der Erdkruste, d.h. die Decke des Festlandes. Böden sind nach oben durch die Atmosphäre und/oder die Pflanzendecke und nach unten durch das Gestein begrenzt. In dem Sinne kann die **Pedosphäre** (= Bodendecke) anschaulich als Durchdringungsbereich der Lithosphäre (= Gesteinshülle), Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre (= Wasserhülle) verstanden werden.

Pedosphäre

Böden sind 3-Phasensysteme. Sie bestehen aus einer **Festphase** (Bodenmatrix aus festen mineralischen und organischen Bestandteilen) und **Bodenporen**, die eine flüssige Phase (**Bodenwasser**) und eine gasförmige Phase (**Bodenluft**) enthalten können. Die meisten Böden sind Naturkörper, das heißt, sie sind lokal spezifisch durch natürliche Prozesse entstanden. Dazu gehören insbesondere die Verwitterung der Ausgangsgesteine und die Entstehung von "sekundären" Mineralen und organische Bodensubstanzen, Stoffumsetzung und Stoffumlagerung in sich sowie Gefügebildung durch Aggregation und Hohlraumformung. Im Zusammenwirken dieser Prozesse entstehen charakteristische horizontale Bodenlagen, die **Bodenhorizonte**.

Festphase

Bodenporen

Bodenwasser

Bodenluft

Bodenhorizonte

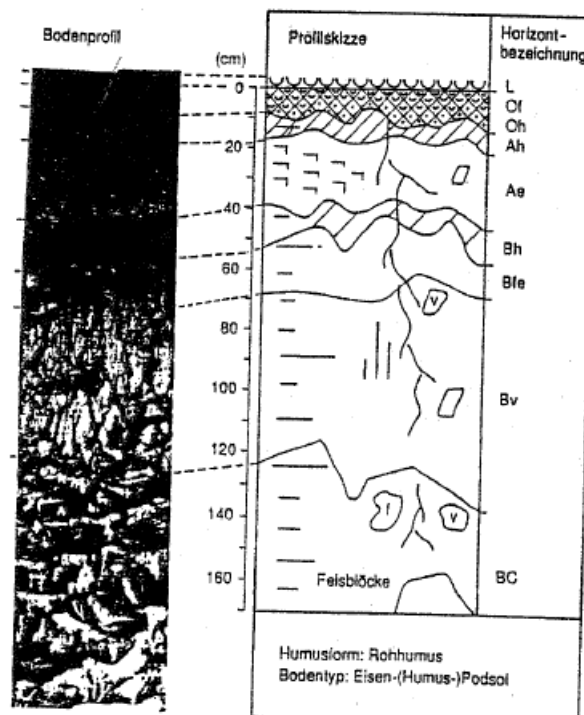


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Bodenprofils

Pedotop

Pedon

Der einzelne Boden wird **Pedon** genannt. Er ist als Bodenprofil durch Anlegen einer Profilgrube (auch Schürf- oder Grabloch) von der Oberfläche bis zur Untergrenze, dem Übergang in das Ausgangsgestein erschließbar (Abbildung 1). Das Bodenprofil zeigt die vertikale Abfolge der Bodenhorizonte, die das Ergebnis der Bodenentwicklung ist. Der Flächenbereich einer Bodeneinheit ist das **Pedotop**. Begrenzt wird das Pedotop durch andersartige Böden der Bodengesellschaft in der Boden-decke. Ihre räumliche Abfolge ist für die Landschaft charakteristisch. Sie kann als Toposequenz, d.h. als topografisch angeordnete Reihe von Bodenprofilen, erfasst werden. Damit sind Böden auch wesentliche Bestandteile von Landschaften.

1.2 Studienaufgabe

Studienaufgabe

Zur Unterstützung und Veranschaulichung der im folgenden Text dargestellten bodenkundlichen Sachverhalte und Zusammenhänge wird die Durchführung einer **Studienaufgabe** empfohlen:

- (1) Auswahl eines Bodens, dessen Erschließung mittels Schürfgrube oder an bereits vorhandenen Aufschlüssen wie Steilufer, Grubenböschung usw. und Nutzung als individuelles Anschauungs- und Studienobjekt (siehe Abbildung 2).
- (2) Unverzügliche Erstaufnahme und Dokumentation entsprechend Anlage 1, S. 106 (Die Anlage 1 enthält das entsprechende Formblatt aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 4 (Arbeitsgruppe Boden, 1994), in dem unbedingt und optional sowie nicht auszufüllende Felder gekennzeichnet sind).
- (3) Übung der Bodenansprache und Erfassung von Bodenmerkmalen im Verlaufe des Studiums,
- (4) abschließende Bodencharakterisierung und -klassifizierung.

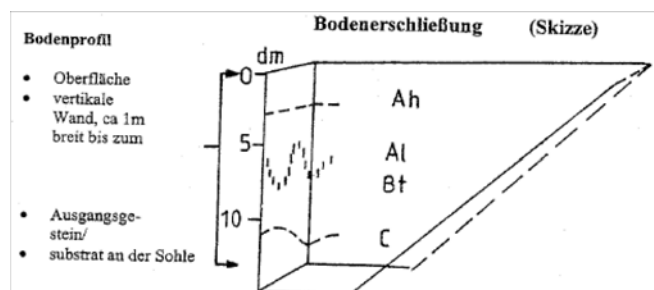


Abb. 2: Erschließung eines Bodenprofils als Schürf mit Spaten, Hacke und Schaufel

2 Bodensubstrat

2.1 Begriff und Gliederung

Die Festsubstanz der Böden wird als **Substrat** bezeichnet. Das Substrat prägt infolge seiner Entstehungsweise (**Lithogenese**) sowie auf Grund der **Korngrößen-** und **Mineralzusammensetzung** den Charakter der Böden. In diesem Abschnitt werden deswegen dargelegt:

*Substrat
Lithogenese
Korngrößen- und
Mineral-
zusammensetzung*

- (Ausgangs-)Gesteine, deren Charakter, Entstehung und Vorkommen;
- Mineralzusammensetzung, insbesondere Tonminerale;
- Körnung, d.h. Korngrößenfraktionen und -analyse;
- Körnungsklassifizierung und Bodenartenansprache;
- Bildungsweise und Klassifizierung der Bodensubstrate.

2.2 Gesteine

Grundbestandteil der Böden sind die an der Erdoberfläche befindlichen „Ausgangsgesteine“. Sie bestehen aus **Mineralen**. Das sind chemisch und kristallin in sich einheitliche Naturkörper. In Böden kommen vorrangig **Silikate** (z.B. Feldspäte, Glimmer), **Oxide** (z.B. Quarz) sowie in Sedimenten auch häufig **Carbonate** (z.B. Kalkstein, Kreide, Dolomit) vor. Die Gesteine werden entsprechend ihrer Entstehungsweise folgendermaßen gegliedert:

*Minerale
Silikate
Oxide
Carbonate*

- **Magmatite** entstehen durch Magmaerstarrung; sie nehmen etwa 2/3 des Volumens der Erdkruste ein. *Magmatite*
- **Sedimentite** sind Absatzgesteine. Sie bilden sich durch Verwitterung, Umlagerung und Absatz oder auch biogen durch Akkumulation von Organismenteilen. Sedimentite bedecken etwa 3/4 der Erdoberfläche, obgleich sie nur etwa 8 % der Erdkruste einnehmen. *Sedimentite*
- **Metamorphite** entstehen nachfolgend aus ursprünglichen Magmatiten bzw. Sedimentiten infolge Umformung während längerer Zeiträume. Dabei verändert sich ihre Struktur, meist jedoch nicht ihre Stoffzusammensetzung. *Metamorphite*

Die **Magmatite** sind geprägt durch die Erstarrungsbedingungen und Magmazusammensetzung:

- Tiefengesteine* • **Tiefengesteine**, z.B. Granit, sind langsam erstarrt und grobkristallin, die Böden darauf grobkörnig, d.h. sandig/kiesig.
- Ergussgesteine* • **Ergussgesteine**, z.B. Basalt, sind schneller erstarrt und deswegen feinkristallin. Deshalb sind die Böden darauf feinkörnig, d.h. bindig.

Der Kieselsäureanteil im Ausgangsmagma prägt die Reaktion der darauf entstandenen Böden nachhaltig mit. Beispielsweise sind die Böden auf Gesteinen mit $> \text{ca. } 60\% \text{ SiO}_2$ (z.B. Granit, Rhyolit) in der Regel sauer; bei $< \text{ca. } 30\% \text{ SiO}_2$ (z.B. Basalt, Gabbro) sind sie ursprünglich basengesättigt und neutral.

- Glaziale Serie*
 - Sedimentäre*
 - Lockergesteine*
 - Geschiebemergel*
 - Sander*
 - Talsande*
- Die **Sedimentite** sind die an der Erdoberfläche vorherrschenden Bodenausgangsgesteine, besonders auch in Deutschland. In Norddeutschland herrschen die in der **glazialen Serie** abgelagerten sedimentären Lockergesteine vor. Dies sind in den Grund- und Endmoränen die glazigenen Geschiebemergel, -lehme und -sande, die steinig und kalkhaltig sind. Regelhaft südlich in der glazialen Serie schließen sich daran durch Schmelzwasser der Gletscher aufgespülte und abgesetzte **Sander** und **Talsande** der jüngsten Eiszeit (Weichselvereisung) an. Noch weiter südlich sowie westlich in Teilen Niedersachsens befindet sich die analoge Abfolge der geomorphologischen Formen und Substrate der vorangegangenen Saale-Eiszeit. Dort sind die geomorphologischen Formen infolge Dauer und periglazialer Bedingungen während der Weichselvereisung jedoch weniger markant ausgeprägt.

- Lößdecken*
 - periglaziäre Fließerden*
 - Schwemmlösse*
 - Flussauen*
 - holozän fluvial*
- In Mitteldeutschland sind schluffig-lehmige (steinfreie) **Lößdecken** mit 0.5-3.0 m Mächtigkeit verbreitet, besonders in und um die Börden. In den an das Tiefland südlich anschließenden Mittelgebirgen sind die Bodenausgangssubstrate vor allem **periglaziäre Fließerden** und **Schwemmlösse**. Sie wurden als ursprüngliche „Frostböden“ im damaligen Eisvorland auf dem Geröll und Festgestein gebildet. In den **Flussauen** des Tief- und Berglandes befinden sich **holozäne fluviale** Ablagerungen. Sie sind sehr feinschichtig abgesetzt und können grob bis feinkörnig sein. Schichtung und Körnung werden durch die Fließgeschwindigkeit des Überflutungswassers herbeigeführt. Vorkommen und Verbreitung der bodenprägenden Substrate an der Erdoberfläche sind aus geologischen Karten ersichtlich, die damit auch auf den Grundcharakter der darauf vorhandenen Böden hinweisen. Ein Überblick über die wesentlichen Ausgangsgesteine der Bodenbildung mit einigen Grundeigenschaften und Beispielen ist in Anlage 2, S. 108 enthalten.

2.3 Mineralbestand in Böden

Gesteine bestehen in der Regel aus mehreren **Mineralen**. Böden führen in sich meist Minerale, die aus dem Ausgangsgestein stammen und relativ unverändert sind. Sie werden **petrogene Minerale** genannt. Außerdem gibt es bodeneigene Mineralneubildungen (**pedogene Minerale**). Zu den pedogenen Mineralen gehören die **Tonminerale** und die **pedogenen Oxide**, insbesondere der Elemente Fe, Al und Mn. Die Tonminerale sind Schichtsilikate, deren Grundverhalten durch Kristallaufbau und -struktur bedingt ist. Sie setzen sich zusammen aus **Oktaederschichten** mit Al^{3+} als Zentralkation sowie ein bzw. zwei daran angegliederten **Tetraederschichten** mit Si^{4+} im Zentrum (siehe Abbildung 3). Bei der Mineralentstehung können die Zentralkationen durch geringerwertige ersetzt sein, z.B. Mg^{2+} anstelle von Al^{3+} bzw. Al^{3+} anstelle von Si^{4+} (isomorpher Ersatz). Infolgedessen sind solche Schichtpakete negativ geladen und können Kationen sorbieren (Kapitel 4.1, S. 31, Kationenaustausch).

Minerale
- petrogen
- pedogen

Oktaeder

Tetraeder

In Tonteilchen sind die Oktaeder- und Tetraederschichten als Schichtpaket miteinander verbunden. Je nach Anordnung unterscheidet man **Zweischichttonminerale** (Beispiele: Kaolinit, Halloysit) und **Dreischichttonminerale** (Abbildung 3). Letztere bilden den Hauptbestandteil der Tonfraktion in Böden gemäßigter und kühler Klimate. Die wichtigsten Vertreter der Dreischichttonminerale sind **Illit**, **Vermiculit**, **Smectit** und **Chlorit**.

Zweischichttonminerale
Dreischichttonminerale
Illit
Vermiculit
Smectit
Chlorit

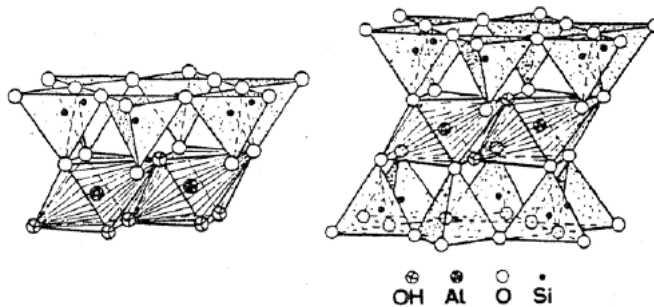


Abb. 3: Anordnung der Tetraeder- und Oktaederschichten in Zweischichtmineralen (links) und Dreischichttonmineralen (rechts) [nach K. JASMUND]

Der Abstand von einer Schichtbasis zur nächsten, einschließlich der Zwischenschicht, ist unterschiedlich bei verschiedenen Tonmineralen: Dieser Schichtabstand beträgt im Kaolinit 0,72 nm, im Illit 1,0 nm; im Vermiculit und Smectit ist er variabel zwischen 1,0 bis > 2,0 nm (Abbildung 4). Diese Veränderbarkeit der Schichtabstände basiert auf der Fähigkeit der genannten Minerale, Kationen mit Hüllen von Wassermolekülen einzufügen. Daraus resultiert eine Vergrößerung der reaktiven Oberfläche sowie eine typische Dynamik von Quellung und

Schrumpfung. Beides hat Auswirkungen auf das gesamte chemische und physikalische Verhalten der entsprechenden Böden.

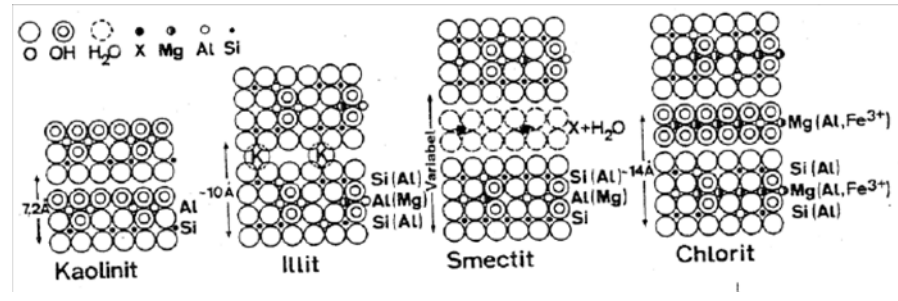


Abb. 4: Strukturmodelle von Kaolinit, Illit, Smectit und Chlorit und ihrer Schichtabstände (X = hydratisierte, austauschbare Kationen zwischen den Silikatschichten (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1989)

Die Mineralzusammensetzung der unterschiedlichen Kornfraktionen von Böden ist sehr verschieden (Abbildung 5). Tonminerale und pedogene Oxide sind hauptsächlich in der Tonfraktion (alle Teilchen < 2 µm) konzentriert. Diese wirkt an den Stoffumsetzungen mit und kann selbst durch Umwelteinflüsse verändert werden. Mit zunehmender Teilchengröße steigen die Gehalte an Glimmern und Feldspäten, die zu den petrogenen Mineralen zählen. Das Bodenskelett besteht überwiegend aus inaktivem Quarz (Kapitel 2.4, S. 13).

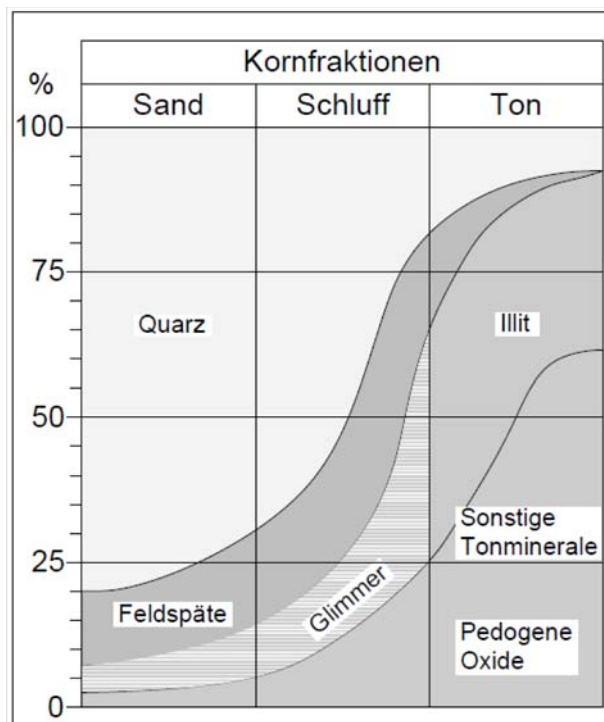


Abb. 5: Schematische Darstellung der durchschnittlichen Mineralzusammensetzung der Kornfraktionen von Böden gemäßiger und kühler Klimate

2.4 Körnung

Die **Korngrößenzusammensetzung** des Substrates wird kurz als **Körnung** bezeichnet; sie ist eines der wichtigsten Merkmale von Böden. Die überragende Bedeutung der Körnung für Bodeneigenschaften resultiert vor allem aus der Beziehung zwischen Körnung, Teilchenanzahl und Oberfläche: Teilt man z.B. einen Würfel von 1 cm³ in Körper mit 0.1 der Kantenlänge (= 1 mm), so resultiert daraus eine Zunahme der Teilchenzahl auf 1.000 und der Gesamtoberfläche auf das Zehnfache (siehe Tabelle 1). Da eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge und Reaktionen an festen Oberflächen bzw. den Phasengrenzen fest/flüssig oder fest/gasförmig abläuft, sind Größe und Beschaffenheit der spezifischen Oberfläche in Böden von grundlegender Bedeutung.

Korngrößenzusammensetzung

Zur Erfassung dieses Charaktermerkmals der Böden dient die **Korngrößenklassifizierung**. Dabei werden die (Einzel-)Körner entsprechend ihrer Äquivalentdurchmesser-Grenzen in **Korngrößenfraktionen** eingeteilt. Da die Mineralkörner meist nicht kugel- oder würfelförmig, z.T. sogar blättchenartig sind, wird zur Korngrößenzuordnung ihre mittlere Achslänge als Äquivalentdurchmesser angewendet und im Bereich 0.0002 - 630 µm klassifiziert (siehe Anlage 3, S. 109 im Anhang). Es gibt international mehrere Systeme der Korngrößenklassifizierung, die aufgrund der Wichtigkeit dieses Merkmals kurz vorgestellt werden.

Korngrößenklassifizierung

Korngrößenfraktionen

Tabelle 1: Wichtige Korngrößenfraktionen und ihre Auswirkungen auf die Körnigkeit des Substrates

Kornfraktion	Repräsentative Kornkantenlänge (mm)	Körnigkeit des Bodensubstrates je cm ³ Festsubstanz		
		Stückzahl	Oberfläche (cm ²)	Oberfläche (m ²)
Feinton	0.0001	10 ¹⁵ (Billiarde)	600.000	60
Grobton	0.001	10 ¹² (Billion)	60.00	6
Mittelschluff	0.01	10 ⁹ (Milliarde)	6.000	0,6
Feinsand	0.1	10 ⁶ (Million)	600	-
Grobsand	1.0	10 ³ (Tausend)	60	-
Mittelgrus	10.0	100 (Eins)	6	-

Bodenskelett

Sand (S)
Schluff (U)
Ton (T)

Bei einem Teilchendurchmesser von 2 mm liegt die Grenze zwischen Fein- und Grobboden. Der Grobboden wird auch als **Bodenskelett** bezeichnet und nach runden oder kantigen Formen der Teilchen benannt. Der Skelettanteil kann (1) in Böden z.B. aus Festgesteinen vorherrschend sein, (2) z.B. in glazigenen Sedimenten in weiten Bereichen variieren und (3) bereits in den Ausgangsgesteinen von Böden völlig fehlen, z.B. in äolischen, fluvialen und marinen Sedimenten. Der Feinboden (< 2 mm Korndurchmesser) wird in die 3 Fraktionen **Sand (S)**, **Schluff (U)** und **Ton (T)** unterteilt, bei denen jeweils weiter Grob-, Mittel- und Fein- unterschieden werden. Die Grenze zwischen Ton (clay) und Schluff (silt) liegt im System der US Division of Agronomy (USDA) ebenfalls bei 0,002 mm, Schluff und Sand werden jedoch bei 0,05 mm voneinander abgegrenzt (gilt auch für Kanada).

abschlämmbare Teile

Feinanteil

Die **abschlämmbaren Teile** der Bodenschätzung in Deutschland haben Durchmesser < 0.01 mm und umfassen damit außer Ton und Feinschluff auch einen Teil des Mittelschluffs. Letzterer gehört zum „Abschlämmbaren“ nach DIN 19683 bzw. TGL 24 300/05 in der Ton und Feinschluff als **Feinanteil** definiert ist.

Voraussetzung für eine analytische Erfassung der Korngrößenzusammensetzung ist die Disaggregation. Das heißt, die gewöhnlich in Aggregaten zusammengelagerten Bodenteilchen müssen chemisch (durch Na⁺-Belegung) oder physikalisch (durch Ultraschall) dispergiert werden. Erst dann können sie mit Siebung und Sedimentation getrennt oder durch optische Verfahren auf ihre Größenverteilung untersucht werden.

Die Körnungsklassifizierung von Bodensubstraten erfolgt auf Grund der Fraktionsanteile von Ton, Schluff und Sand mittels Dreieckskoordinatensystemen, wie sie in Anlage 3, S. 109 zusammengestellt sind. Das Bodenartendiagramm nach DIN 4220 wurde 1994 aktualisiert. In der USDA Soil Taxonomy verlaufen die Grenzlinien im Sandbereich "schräg"; diese Klassen lassen sich deswegen nicht mittels bestimmter Fraktionsgrenzwerte ausdrücken. Die Zusammenstellung dieser Körnungsklassifizierungen in Anlage 4, S. 110 zeigt deren Verschiedenheit und ist eine Grundlage für die Interpretation von Literaturangaben zur Körnung von Böden. Um dies zu üben, wird empfohlen, die Körnungsklassen aufgrund vorgegebener Anteile der Korngrößenfraktionen nach den unterschiedlichen Systemen abzuleiten und in Tabelle 2 gegenüberzustellen.

Tabelle 2: Übungsaufgabe zur Ermittlung der Körnungsklassen nach verschiedenen Klassifikationssystemen

Anteile %			Körnungsklassen/-bezeichnung			Beispiele aus	
S	U	T	Deutsch-land	Boden-schätzung	USDA		
90	4	6				Jung-moränen-substrat	Ap
64	14	22					Bt
74	12	14	Sl4	ls	s. loam		C
56	30	14				Alt-moräne	AP
24	70	6				Löß	
34	28	38				Aue	
4	48	48				Marsch	

Für die Bodenansprache im Gelände ist die Erfassung der Körnung und Ermittlung der Bodenart in den Bodenlagen mittels **Handprüfung/Fingerprobe** unerlässlich. Dafür wurde aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) ein praktikabler Schlüssel zusammengestellt, der auf den Verhaltensmerkmalen der Bodenarten beruht (siehe Anlage 5, S. 111). Voraussetzung für die Fingerprüfung von Bodenproben ist hinreichende Feuchte, d.h. sie muss die Haut befeuchten, darf weder nass (Wasser auspressbar) noch frisch (nicht fühlbar feucht) oder gar trocken (aufgehellt) sein. Zu beachten ist weiterhin, dass Humus die so zu erfassenden Merkmale mitprägen kann. Als Studienaufgabe wird die Feststellung der Bodenart in allen Lagen des eigenen Anschauungsprofils mit Hilfe der Anlage 5, S. 111 empfohlen. Die Ergebnisse sind in das Formblatt in Anlage 1, S. 106 im Anhang einzutragen.

*Handprüfung/
Fingerprobe*

2.5 Bodensubstratcharakterisierung

Das Substrat ist die Festsubstanz der Böden und damit für sie charakterprägend. Gestaltet werden die Substrate durch ihre Bildungsweise (Genese). Sie verursacht die **Substratzusammensetzung**, besonders Körnung sowie Mineralbestand, außerdem die Verbreitung und Anordnung von **Substratlagen** in der Bodendecke. Substraterfassung und -klassifikation sind deswegen Grundlage der Bodencharakterisierung sowie der Bodenkartierung und -bewertung.

Substrat-zusammensetzung

Substratlagen

Für die Bodensubstraterfassung und -charakterisierung werden die **Substratart** entsprechend Genese und Zusammensetzung, v.a. Körnung, sowie Schichtabfolge der Substratarten bis in 2,0 m Tiefe unter

Substratart

Substrattyp

Flur als **Substrattyp** zusammengefasst (Bodenkundliche Kartieranleitung 2005).

organogen

Die Substratzusammensetzung der Lagen (Geologische Schichten oder Bodenhorizonte) von Mineralböden wird durch Handprobe oder Körnungsanalyse als Bodenart erfasst und dann einer Substratgruppe zugeordnet. Die äolischen Substrate werden auf Grund ihres Sandanteiles von Löß bis Flugsand gruppiert. Die auf Grund hoher Gehalte an organischen Substanzen als **organogen** bezeichneten Moorsubstrate werden nach ihrer Bildungsweise unterteilt. Der Grundcharakter jeder Boden(substrat)lage wird als Substratart gekennzeichnet mittels Symbol der Bildungsweise vor Symbol der Substratgruppe. Die meisten Böden führen bis in die Tiefe von 1.2 - 2.0 m mehrere Lagen verschiedener Substratarten; wenige bestehen nur aus einer Substratlage größerer Mächtigkeit. Die Grenztiefen zwischen Substratlagen bis in 1.2 m unter Flur werden in 3 Stufen unterteilt und dementsprechend benannt sowie symbolisiert. Zusammen mit der Benennung/Symbolisierung der Substratgruppen ergibt sich dann der Substrattyp. Er ist mittels Symbolen dokumentierbar. Diese Regeln sowie einige Beispiele für wichtige und weit verbreitete Substrate sind in den Anlage 6, S. 112 und Anlage 7, S. 113 im Anhang zusammengestellt.



ALLGEMEINE GEWÄSSERKUNDE

GÜNTER SCHLUNGBAUM
UWE SELIG

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Einleitende Bemerkungen zum Studienmaterial und Darstellung wichtiger Lehr- und Lernziele	9
1 Die Wasserressourcen der Erde und der Wasserkreislauf	11
1.1 Die Verteilung des Wassers	11
1.2 Der Wasserkreislauf und seine Elemente	13
1.3 Wasserdargebot und Wasserverbrauch	15
2 Ausgewählte Aspekte der historischen Entwicklung der Wissenschaftsdisziplinen um das Wasser - ihre Stellung im System der Naturwissenschaften	17
3 Physikalische Eigenschaften des Wassers	21
3.1 Struktur und Eigenschaften	21
3.1.1 Dichte und Dichteanomalie des Wassers	22
3.1.2 Adhäsion und Kohäsion	24
3.1.3 Oberflächenspannung	24
3.1.4 Viskosität	25
3.1.5 Wärmeeigenschaften des Wassers	25
3.2 Einfluss auf physikalische, chemische und biologische Reaktionen und Prozesse im Gewässer	26
3.3 Wasserarten/Gewässertypen und ihre Einteilung	27
3.4 Gewässer als Lebensraum	30
3.4.1 Die Temperatur als Faktor für die Lebensfähigkeit von Wasserorganismen	31
3.4.2 Einige Aspekte zur ökologischen Bedeutung des pH-Wertes für Wasserorganismen	32
4 Das Strahlungsklima im Gewässer	35
5 Der Wärmehaushalt der Gewässer	41
5.1 Prozesse zur Wärmebilanz	41
5.2 Der Wärmehaushalt von Seen	41

5.3	Der Wärmehaushalt der Fließgewässer	45
5.4	Der Wärmehaushalt des Meeres	47
5.5	Der Wärmehaushalt und einige wichtige Beziehungen zur Biologie der Gewässer	49
6	System der Oberflächengewässer	51
6.1	Fließgewässer	51
6.1.1	Allgemeine Charakteristik der Fließgewässer	51
6.1.2	Zur Entstehung der Fließgewässer	52
6.1.3	Fließgewässerstrukturen / Fließgewässertypen	53
6.1.4	Fließgewässerzonierungen im Längsschnitt	57
6.1.5	Der Stoff- und Energiehaushalt der Fließgewässer	61
6.1.6	Das Selbstreinigungsvermögen der Fließgewässer	64
6.1.7	Der Mensch verändert die Fließgewässer	67
6.2	Stehende Binnengewässer / Seen	69
6.2.1	Allgemeine Charakteristik von Seen	69
6.2.2	Zur Entstehung der Seen und die Seentypen	70
6.2.3	Topographische und ökologische Zonierungen in Seen - eine wichtige Grundlage für die Charakteristik der Lebensräume	75
6.2.4	Der Stoffhaushalt der Seen	77
6.2.5	Ausgewählte Aspekte der biogeochemischen Stoffkreisläufe in Seen (in Gewässern)	79
6.2.6	Trophieverhältnisse und Eutrophierung	88
6.2.7	Probleme der anthropogenen Eutrophierung	92
6.3	Ozeane und Meere	94
6.3.1	Größe, Verteilung und Tiefenverhältnisse des Weltmeeres	94
6.3.2	Der Salzgehalt - eine Besonderheit des Meerwassers	96
6.3.3	Der Salzgehalt als ökologischer Faktor	98
6.3.4	Zonierungen im Lebensraum Meer	99
6.3.5	Strömungssysteme im Weltmeer	101
6.4	Küstengewässer	103
6.4.1	Definition und allgemeine Charakteristik	103
6.4.2	Die ökologischen Besonderheiten im Brackwasser	106
6.4.3	Deutsche Küstengewässer	107
6.4.3.1	Das Wattenmeer der Nordsee	108
6.4.3.2	Küstengewässer der deutschen Ostseeküste	108
6.5	Moore und Sümpfe	115

7	Unterirdische Wässer / Gewässer	119
7.1	Das Wasser im Boden	119
7.2	Das Grundwasser	121
8	Gewässerbewertung - Wasserbeschaffenheit/ Gewässergüte	123
8.1	Grundlagen der Gewässerbewertung	123
8.2	Bisherige Bewertungsansätze und -kriterien in Deutschland	124
8.3	Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und Bewertung des guten ökologischen Zustandes	127
9	Zur Bedeutung der Gewässer als Landschaftsbestandteil und in der gesellschaftlichen Nutzung	133
	Literaturverzeichnis	135
	Glossar	139
	Abbildungsverzeichnis	143
	Tabellenverzeichnis	147
	Stichwortverzeichnis	149

Einleitende Bemerkungen zum Studienmaterial und Darstellung wichtiger Lehr- und Lernziele

Das Stoffgebiet „Allgemeine Gewässerkunde“ ist als selbständige Lerneinheit in das Modul „Naturwissenschaftliche und technische Grundlagen“ im Rahmen des weiterbildenden Fernstudiums „Umweltschutz“ eingeordnet worden. Dennoch ist es in enger Verbindung zu weiteren Stoffeinheiten, wie z. B. „Allgemeine Bodenkunde“, „Klima und Wetterkunde“, „Biogeochemische Stoffkreisläufe“ und „Gewässerschutz und Gewässernutzung“ zu sehen.

Bei der Vermittlung von Kenntnissen geht es um Grundlagen, die den Studenten den Stoff „Wasser“ in seiner Eigenheit, seiner Bedeutung, seiner Vielfalt und seinen Grundlagen für alle Lebensprozesse auf der Erde näher bringen. In diesem Zusammenhang soll der globale Kreislauf des Wassers auf der Erde mit allen Wirkungen dargelegt werden. Dazu gehören Kenntnisse über die Struktur und Eigenschaften des Wassers selbst und die sich daraus ergebenden Wirkungen sowie u.a. auch der Wärme- und Strahlungshaushalt der Natur.

Aus dem Wasserkreislauf im Allgemeinen sind Kenntnisse über die Vielfalt von Gewässertypen erforderlich. Sind Seen und Meere wichtige Speicherräume für die Wasserinhaltsstoffe, so wirken Flusssysteme als Drainagen der Landschaft. Stoffhaushalt, Stoffkreisläufe und Stofftransport sind wichtige Oberbegriffe aus diesem wasser- und gewässertypischen Wirkungsfeld. Neben der Gliederung der Gewässer hinsichtlich hydromorphologischer Struktur und biologischer Besiedlung soll in diesem Lehrbrief ein Einblick in die Gewässerbewertung hinsichtlich der anthropogenen Belastungen sowie die Harmonisierung des europäischen Wasserrechtes durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie gegeben werden.

Die Leser des Lehrbriefes werden bald merken,

- dass kein Gewässer so ist wie ein anderes,
- dass Gewässer in den gemäßigten Breiten andere Verhaltensweisen zeigen als solche in
 - subtropischen oder tropischen Bereichen,
- dass Gewässer sehr unterschiedlich belastbar sind,
- dass es heute nur noch wenige natürliche oder naturnahe Gewässer auf der Erde gibt.

Dem Leser sollte aber auch bewusst sein, dass der Mensch durch seine immer größer werdenden Eingriffe in den Naturhaushalt – dazu gehören

auch die Gewässer – dabei ist, seine eigene Existenzgrundlage zu vernichten.

In diesem Sinne ist die „Allgemeine Gewässerkunde“ sehr wohl selbst ein wichtiges Stoffgebiet; sie ist aber vielmehr als ein Teil des Gesamtkomplexes „Natur“ zu verstehen.

1 Die Wasserressourcen der Erde und der Wasserkreislauf

1.1 Die Verteilung des Wassers

Das Wasservorkommen der Erde wird auf ca. 1,46 Milliarden km³ geschätzt. Die großen Flächen der Weltmeere bestimmen zu etwa 71 % das Gesicht der Erdoberfläche. Die Ozeane enthalten ca. 96,5 % der Wassermengen. 3,5 % verteilen sich auf alle anderen Wasserformen. Dazu gehört nicht nur das flüssige Wasser der Oberflächengewässer, sondern auch die feste Phase in Form von Schnee und Eis, die gasförmige als Wasserdampf in der Atmosphäre, das im Boden vorhandene Wasser und das in Organismen gebundene Wasser.

Wasserressourcen

Wasserverteilung

Mit der Tabelle 1.1 wird eine Übersicht über die Süßwasserverteilung gegeben (ohne Meerwasser = 100 %).

Tabelle 1.1: Die Süßwasservorräte der Erde (nach Baumgartner und Liebscher, 1990)

Vorkommen	Wasservolumen km ³	Areal 10 ⁶ km ²	Schichtdicke m	Anteil %
Polareis, Meereis, Gletscher, Schnee davon:	24.364.100	6	1.460	68,7
• Antarktis	21.600.000	14	1.546	(61,7)
• Grönland	2.340.000	1,8	1.298	(6,68)
• Artische Inseln	83.500	0,23	369	(0,24)
• Gebirge	40.600	0,22	181	(0,12)
Bodeneis (Permafrost)	300.000	21	14	0,86
Grundwasser davon:	10.530.000	135	78	30,1
• bis 100 m Tiefe	3.600.000	135	27	(12,6)
• Bodenfeuchte	16.500	82	0,2	0,05
• Süßwasserseen	91.000	1,24	74	0,26
• Moore, Sümpfe	11.470	2,7	4,3	0,03
• Flüsse	2.120	149	0,014	0,006
• Organismen	1.120	510	0,0001	0,003
• Atmosphäre	12.900	510	0,001	0,04
Total	35.029.210	149	235	100

Danach sind binnenländische Oberflächengewässer nur mit 0,27 % am Gesamtsüßwasser beteiligt. Die Hauptanteile sind im Gletschereis und Schnee sowie im Grundwasser mit zusammen rund 99 % vereinigt.

Die Wasserressourcen sind auf der Erde nicht gleichmäßig verteilt. Für die Land/Wasser-Verteilung auf der Erdoberfläche ergeben sich in 10^6 km² die folgenden Werte:

	Land	Wasser	Summe
Nordhalbkugel	100,3 = 39,3 %	154,6 = 60,7 %	254,9 = 100 %
Südhalbkugel	48,60 = 19,1 %	206,5 = 80,9 %	255,1 = 100 %
Erde	148,9 = 29,2 %	361,1 = 70,8 %	510,0 = 100 %

Auch die Oberflächengewässer sind auf der Erde sehr ungleichmäßig verteilt. Dadurch gestaltet sich die Wasserproblematik in allen Ländern sehr unterschiedlich.

In der globalen Wasserbilanz (alle Wasservorräte) sind die im Schnee und Eis der Polargebiete, im Meereis, in den Gebirgsgletschern, den permanenten Schneefeldern und in den Dauerfrostböden festgelegten Wassermassen mit 1,76 % des Gesamtvolumens beteiligt. Diese Wassermenge würde den Spiegel des Weltmeeres um 68 m anheben, wenn sie zum totalen Schmelzen käme. In Warm- und Kaltzeiten kann der Meeresspiegel beträchtlich schwanken und in Flachwassergebieten die Verteilung von Wasser und Land großräumig beeinflussen. Diese Räume sind biogeographisch von großer Bedeutung.

Hydrosphäre

Pedosphäre

Lithosphäre

Atmosphäre

Geosphäre

Biosphäre

Das Wasser der Weltmeere und das oberirdische Wasser auf dem Festland gehören zur eigentlichen **Hydrosphäre**. Die zeitweilig oder immer vollständig mit Wasser gefüllten Zonen des Bodens (**Pedosphäre**) und die im tieferen Untergrund (Grundwasser) gehören sowohl zur **Lithosphäre** als auch zur Hydrosphäre. Durch Verdunstung und Niederschlag ist die **Atmosphäre** mit der Hydrosphäre und der Lithosphäre funktionell verknüpft. Lithosphäre, Atmosphäre und Hydrosphäre bilden zusammen die **Geosphäre**. Der davon mit Leben erfüllte Raum stellt die **Biosphäre** dar (vgl. Abbildung 1.1).

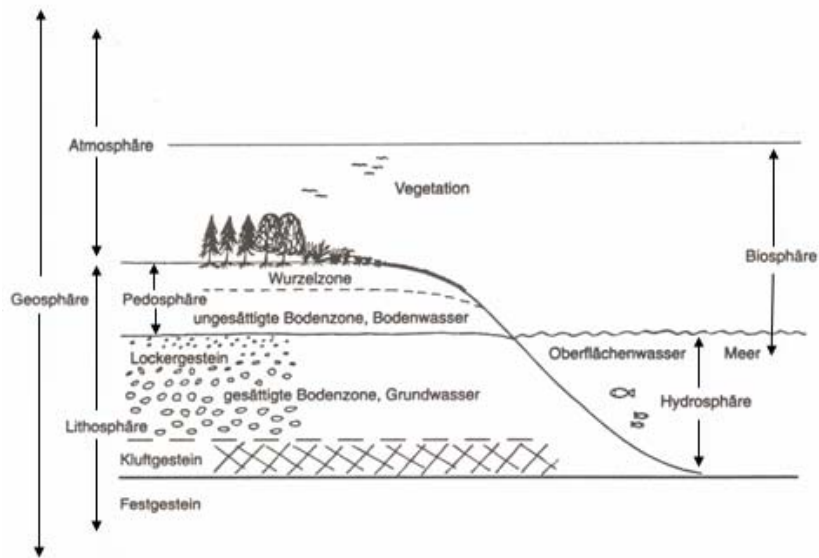


Abb. 1.1: Die Hydrosphäre als Bestandteil der/mit der Geosphäre (aus SCHWOERBEL, 1993)

1.2 Der Wasserkreislauf und seine Elemente

Der **Wasserkreislauf** beschreibt die Zustands- und Ortsveränderung des Wassers durch **Niederschlag**, **Verdunstung**, **Abfluss** und **Speicherung**. Diese Bilanzglieder stehen in der folgenden Beziehung zueinander:

Wasserkreislauf

$$\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung} + \text{Abfluss} \pm \text{Speicherung}$$

Für den globalen Kreislauf werden allgemein die in Abbildung 1.2 angegebenen Größen zu Grunde gelegt.

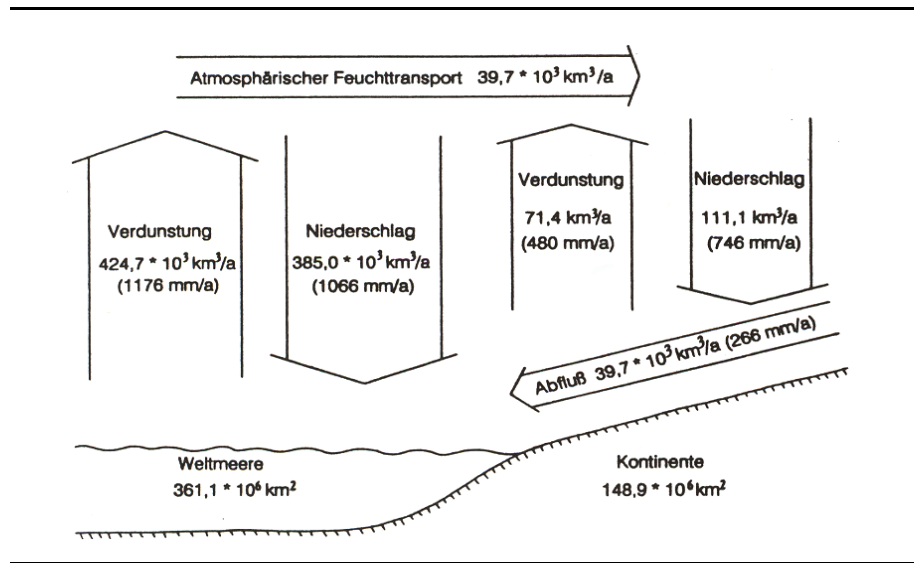


Abb. 1.2: Schema des globalen Wasserkreislaufes der Erde (Zahlenangaben aus BAUMGARTNER et al., 1975)

In Abhängigkeit vom Wärmehaushalt der Erde (Kapitel 5, S. 41) gibt es starke Differenzierungen in der regionalen Verteilung.

Schon für die Nord- und Südhalbkugel der Erde ergeben sich größere Unterschiede, bedingt durch die unterschiedliche Wasser/Land-Verteilung (vgl. Tabelle 1.2).

Wasserbilanz

Tabelle 1.2: Globale Wasserbilanz N = Niederschlag, V = Verdunstung, Ao = oberirdischer Abfluss (übernommen aus SCHWOERBEL, 1993)

	Fläche (10 ⁶ km ²)	N		V		Ao	
		(10 ³ km ³)	(mm)	(10 ³ km ³)	(mm)	(10 ³ km ³)	(mm)
Nordhalbkugel							
• Land	100,3	68,0	678	43,6	435	24,4	243
• Ozean	154,6	179,4	1160	185,3	1198	-5,9	-38
• Gesamt	254,9	247,4	970	228,9	897	18,5	73
Südhalbkugel							
• Land	48,6	43,1	888	27,8	572	15,3	316
• Ozean	206,5	205,6	996	239,4	1160	-33,8	-164
• Gesamt	255,1	248,7	975	267,2	1048	-18,5	-73
Global							
• Land	148,9	111,1	746	71,4	480	39,7	266
• Ozean	361,1	385,0	1.066	424,7	1176	-39,7	-110
• Gesamt	510,0	496,1	973	496,1	973	-	-

Die Angaben in Abbildung 1.2 und in Tabelle 1.2 zeigen, dass die größten Wassermassen über dem Meer umgesetzt werden. Der überwiegend hier verdunstete Anteil fällt als Niederschlag wieder auf die Meeresoberfläche zurück. Nur 266 mm = 36 % des Jahresniederschlages auf dem Festland stammen aus mariner Verdunstung. Diese Menge fließt aber als jährlicher Abfluss dem Meer wieder zu.

Eingebettet in diesen Kreislauf sind die als kurz- oder längerzeitige **Speicher** wirkenden Süßwasserressourcen des Festlandes. Ein direkter Abfluss ergibt sich über die Flüsse oder mit Flüssen verbundenen Seen. Abflusslose natürliche und künstliche Seen sowie der Weg über die Bodenpassage verzögern den direkten Abfluss (= längere Speicherung).

1.3 Wasserdargebot und Wasserverbrauch

In Deutschland können wir über ein Wasserdargebot von ca. 160 Milliarden Kubikmeter im Jahr verfügen. Als **Wasserdargebot** versteht man die Menge Wasser, welche aus dem natürlichen Wasserkreislauf während eines Jahres zur Nutzung verbleibt. Während in vielen Ländern der Erde Wassermangel herrscht, so ist die Bundesrepublik Deutschland eher ein wasserreiches Land. Die künftige weltweite Wassernutzung wird sich aber weiter erhöhen. Ein wesentlicher Grund wird die wachsende Bevölkerung und ihre zunehmende Konzentration in großen Ballungsräumen sein. Bis zum Jahr 2025 wird sich die Wassernutzung in der Landwirtschaft, vor allem aufgrund der Ausdehnung der bewässerten Fläche, nach neueren Prognoserechnungen auf 3.655 km³ bzw. gegenüber 1995 um 18 % erhöhen, wobei starke regionale Unterschiede zu erwarten sind. Rund zwei Drittel der gesamten Wasserentnahme entfällt heute auf die Landwirtschaft. Etwa 20 Prozent verbraucht die Industrie, gut zehn Prozent fließen in private Haushalte.

Während die landwirtschaftliche Wasserentnahme in den Industriestaaten zurückgehen wird, so ist vor allem in Afrika (südlich der Sahara) und Südamerika mit einer weiteren starken Zunahme zu rechnen, wo die bewässerte Fläche um 114 % bzw. 180 % zunehmen wird. Die Industrialisierung in den Entwicklungsländern führt auch zu einer Zunahme des Wasserverbrauches im industriellen Sektor trotz einer rückläufigen Entwicklung in den Industrieländern. Dem steigenden Wasserverbrauch entgegenwirken können nur Verbesserung der Effizienz in Landwirtschaft und Industrie und ein sorgfältigerer Umgang mit den vorhandenen Vorräten, besonders in den westlichen Industrieländern.

Während 1950 noch 85 Liter am Tag pro Person in Deutschland reichten, so wurde in den 1980er Jahren ein Wasserverbrauch bis zu 200 Li-

ter pro Tag und Person erreicht. Heute – bedingt durch die vielfältigen Entwicklungen von wassersparenden Technologien – ist der Verbrauch wieder auf durchschnittlich 120 - 130 Liter gesunken, wobei diese Menge in den letzten Jahren konstant geblieben ist. Damit hat Deutschland einen relativ geringen Wasserverbrauch, welcher derzeit in Ungarn mit 107 Liter im europäischen Vergleich am geringsten ist und in den USA mit 300 Liter pro Person weiterhin sehr hoch ist.

Abbildung 1.3 gibt einen Überblick über die prozentuale Verteilung des Wasserverbrauches pro Person in Deutschland.

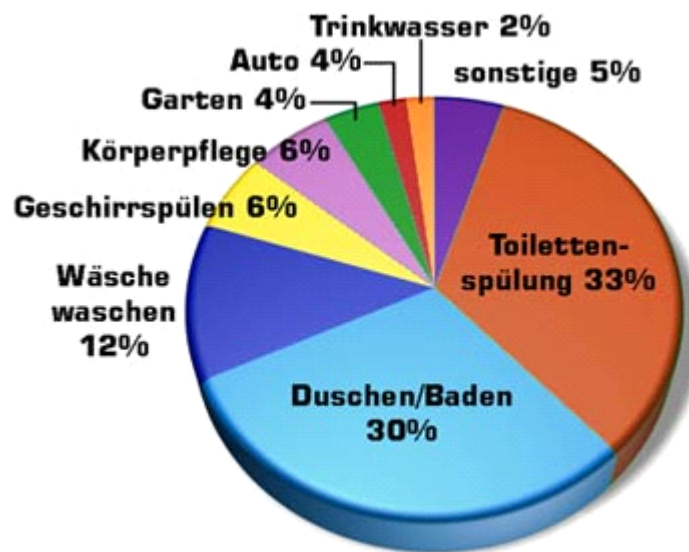


Abb. 1.3: Prozentuale Verteilung des Wasserverbrauches pro Person und Tag in Deutschland

2 Ausgewählte Aspekte der historischen Entwicklung der Wissenschaftsdisziplinen um das Wasser - ihre Stellung im System der Naturwissenschaften

Auf ihrem Hunderttausende von Jahren währenden Weg war die Menschheit in mancherlei Hinsicht mit dem Wasser verbunden oder vom Wasser abhängig. Waren es zunächst

- die Trinkwasserbeschaffung für Mensch und Tier,
- die Nahrungsversorgung durch Fischfang,
- die Nahrungsversorgung durch Pflanzen, deren Wachstum nur durch Wasser ermöglicht wird,
- die Fortbewegung von Menschen und Lasten auf dem Wasser,
- einfache Formen der Wasserkraftnutzung (z. B. Wassermühlen),

so brachte die fortschreitende kulturelle und zivilisatorische Entwicklung neue Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur und so auch zwischen Mensch und Wasser.

- Gewerbe und Industrie benötigen Wasser für den Produktionsablauf.
- Der Wasserbedarf der Haushalte ist mit der weitgehenden Verdrängung manueller Tätigkeit durch Maschinen um ein Vielfaches gestiegen.
- Volkswirtschaft und Haushalte verlangen nach elektrischer Energie (direkt oder indirekt spielt hier Wasser eine wichtige Rolle).
- Die sprunghaft wachsende Erdbevölkerung erfordert neue Herangehensweisen an die Wassernutzung, z. B. die künstliche Bewässerung für die Sicherung der pflanzlichen Produktion.

Schon immer stellten die verschiedenen Ansprüche hinsichtlich der Menge, der zeitlichen Verfügbarkeit und der Güte des Wassers die Menschen vor Probleme. Diese Probleme haben sich mit Beginn der in-

dustriellen Revolution sowohl zeitlich als auch in der regionalen Gestaltung enorm verschärft. Hinzu kommt die Überforderung der Oberflächengewässer in der Nutzung des biologischen Gleichgewichtes durch die Abwassereinleitungen und beim Grundwasser die durch falsche Maßnahmen in der landwirtschaftlichen Produktion. Je stärker der Mensch die Nutzung intensiviert und damit die natürlichen Funktionen stark veränderte, umso naturferner wurden die Gewässer. Die heutige Wassersituation nach verfügbarer Menge und vorliegender Qualität hat ihre tieferen Ursachen in der verhängnisvollen Fehleinschätzung der Natur und der Naturleistungen bei den meisten alten und heutigen Kulturvölkern der Erde.

Limnologie

Ozeanologie

Im Gleichlauf mit dieser Entwicklung, die sich immer schneller vollzog, hat sich der Mensch auch mit Fragen des Wassers auseinandergesetzt. Die Geschichte der **Limnologie** (der Kunde von den Süßgewässern) und der **Ozeanologie** (Meereskunde) reicht erst gut 100 Jahre zurück. Vorher, im 17. Jahrhundert und besonders im 18. Jahrhundert, gab es spezielle Untersuchungen zur Biologie von Wasserorganismen. Man erforschte deren Ernährung, Fortpflanzung und Verhalten im Wasser. Eine Beziehung zum Gewässer selbst fehlte noch. Dieser Zeitraum ist mit solchen Namen verbunden wie z. B. O. F. MÜLLER, J. Ch. SCHÄFER, J. C. EICHHORN. Diese Epoche war eine typische Hydrobiologie und noch keine Limnologie. Erstmals haben F. JUNGE (1885) und T. S. FORBES (1887) „das Gewässer als Mikrokosmos“ aufgefasst. Aus diesem hydrobiologischen Vorfeld entwickelte sich die Limnologie zunächst nur langsam, nachdem J. MÜLLER (1845) mit der Entdeckung des Meeresplanktons auch der Süßwasserbiologie neue Impulse gegeben hatte. Den entscheidenden Schritt von der Hydrobiologie zur Limnologie tat F. A. FOREL (1841 - 1912) in Lausanne, der den Genfer See nicht nur biologisch, sondern auch physikalisch und chemisch untersuchte und auch die ersten Gedanken über Seentypen äußerte. Er nannte sein Arbeitsgebiet **Limnologie**. Für die Meereskunde lag die Geburtsstunde etwa gleichzeitig. Von 1872 bis 1876 fand mit der Challenger-Expedition das erste weltweit orientierte Forschungsprogramm statt. Danach entwickelte sich die Gewässerkunde in allen Teildisziplinen auf der ganzen Welt sehr stürmisch, wobei schon wegen der räumlichen Verzahnung von Binnengewässern auf dem Land mit den Ozeanen Limnologie und Ozeanologie sehr viele Berührungspunkte hatten und haben. Gemeinsame Grundprobleme des Wasserkreislaufes, des aquatischen Stoffumsatzes, des Energieflusses, der Nahrungsketten usw. wurden und werden von beiden Disziplinen gemeinsam untersucht.

Die heutige Wissenschaft von den Gewässern integriert alle naturwissenschaftlichen Richtungen. Je nach Betrachtungsweise, je nach Aufgabenstellung sowie je nach Arbeitsinhalt und Methodik gewinnen die umfassenden Querschnittswissenschaften – dazu gehören auch Limno-

logie und Ozeanologie – an Bedeutung. Immer mehr werden beide heute als Teil der **Ökologie**, der Lehre vom Haushalt der Natur, aufgefasst. Dabei haben sich aber auch spezielle Richtungen, wie Limnochemie, physikalische Ozeanologie usw., herausgebildet. Das Feld reicht heute bis zu angewandten Richtungen: Wasserhygiene, Wasserwirtschaft, Fischwirtschaft, Trink-, Brauch- und Abwasserbiologie.

Ökologie

UHLMANN (1988) hat aus der Sicht der Hydrobiologie die Einzelwissenschaften in ihrer Vernetzung untereinander wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

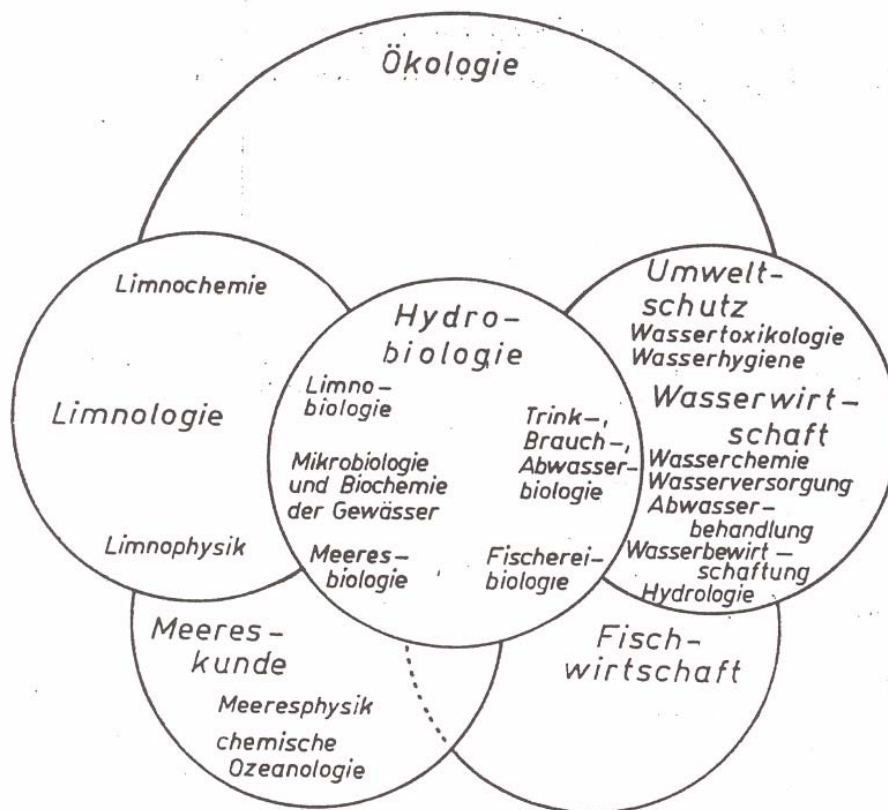


Abb. 2.1: Hydrobiologie, gewässerkundliche Einzelrichtungen in der Vernetzung mit benachbarten Wissenschaftsdisziplinen (aus UHLMANN, 1988)

Heute können Einzeldisziplinen zwar notwendige, aber nicht unbedingt komplexe Erkenntnisse erbringen. Der ökosystemare ganzheitliche Ansatz in der Forschung ist für die Lösung der Mensch-Natur-Probleme erforderlich.



KLIMA- UND WETTERKUNDE

Henning Baudler
Heidrun Böttcher

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Bemerkungen zum Studienmaterial	V
1 EINLEITUNG	7
1.1 Gegenstand der Meteorologie	7
1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen	8
2 VERTIKALER AUFBAU DER ATMOSPHERE	13
2.1 Molekularer Aufbau der Atmosphäre	13
2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre	14
2.3 Elektrischer Aufbau der Atmosphäre	22
2.4 Magnetischer Aufbau der Atmosphäre	23
3 METEOROLOGISCHE ELEMENTE	25
3.1 Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde und der Atmosphäre	25
3.1.1 Sonnenstrahlung	26
3.1.2 Einfluss der Atmosphäre auf die Sonnenstrahlung	27
3.1.3 Globale Verteilung der solaren Strahlungsgrößen	33
3.1.4 Langwellige Ausstrahlung der Erde und der Atmosphäre	34
3.1.5 Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	37
3.1.6 Globale Strahlungsbilanz	39
3.1.7 Wärmetransportprozesse zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre	40
3.1.8 Zonen des solaren Klimas	44
3.1.9 Strahlungsmessung	44
3.2 Lufttemperatur	46
3.2.1 Messung der Lufttemperatur	47
3.2.2 Tagesgang der Lufttemperatur	48
3.2.3 Jahresgang der Lufttemperatur	50
3.2.4 Horizontale Temperaturverteilung	52
3.2.5 Vertikale Temperaturänderung in der Troposphäre	54
3.2.6 Temperaturänderungen unter dem Einfluss von Vertikalbewegungen	55
3.2.7 Planetarische Frontalzone	60
3.3 Luftfeuchte	62
3.3.1 Messung der Luftfeuchte	63
3.3.2 Tagesgang der Luftfeuchte	64
3.3.3 Jahresgang der Luftfeuchte	66
3.3.4 Horizontale Verteilung der Luftfeuchte	67
3.3.5 Vertikale Verteilung der Luftfeuchte	67
3.4 Bewölkung	69

3.4.1	Nebel- und Wolkenbildung	69
3.4.2	Einteilung der Wolken	72
3.5	Luftdruck.....	76
3.5.1	Messung des Luftdruckes.....	77
3.5.2	Änderung des Luftdruckes mit der Höhe	77
3.5.3	Tagesgang der Änderungen des Luftdruckes	78
3.5.4	Jahresgang der Änderungen des Luftdruckes.....	79
3.5.5	Bodenwetterkarte	80
3.5.6	Höhenwetterkarte	82
3.5.7	Entstehung horizontaler Druckunterschiede	84
3.6	Luftbewegungen in der Atmosphäre	85
3.6.1	Messung des Windes.....	85
3.6.2	Kräfte bei horizontaler Luftbewegung	86
3.6.3	Tagesgang des Windes	92
3.6.4	Jahresgang des Windes.....	93
3.6.5	Orographische Windsysteme.....	94
3.7	Niederschlag.....	101
3.7.1	Niederschlagsmessung	101
3.7.2	Jahresgang des Niederschlages in Deutschland und Mitteleuropa.....	101
3.7.3	Globale Verteilung des Niederschlages	102
4	PRAKTISCHE WETTERKUNDE	105
4.1	Regeln aus dem Verlauf des Luftdruckes	105
4.2	Regeln aus Windanzeichen	105
4.3	Regeln nach dem Aussehen des Himmels.....	106
5	ALLGEMEINE ZIRKULATION	108
5.1	Allgemeines.....	108
5.2	Mittlere globale horizontale Luftdruckverteilung in Bodennähe	109
5.3	Mittlere horizontale Windverteilung in Bodennähe	113
5.4	Mittlere globale Zirkulationen.....	113
5.4.1	Zirkulationen in niederen und hohen Breiten.....	114
5.4.2	Zirkulationen in den gemäßigten Breiten.....	115
5.4.3	Dynamik des Energieaustausches zwischen niederen und hohen Breiten	116
5.5	Jahresgang der allgemeinen Zirkulation.....	118
5.6	Monsune	119
6	WETTER IN DEN GEMÄßIGTEN BREITEN.....	122
6.1	Luftmassen	122
6.2	Bildung dynamischer Hoch- und Tiefdruckgebiete	124
6.3	Wetter im Hochdruckgebiet	128

6.4	Wetter im Tiefdruckgebiet	129
6.4.1	Wetter in einer jungen Zyklone.....	129
6.4.2	Wetter in einer gealterten Zyklone.....	133
6.4.3	Zugbahnen der Zyklonen	135
6.4.4	Troglage	136
6.5	Typische Großwetterlagen	136
6.5.1	Westlagen	137
6.5.2	Ostlagen.....	139
6.5.3	Südlagen	139
6.5.4	Nordlagen	140
7	KLIMAKUNDE	141
7.1	Klimaklassifikation	141
7.1.1	Effektive Klimaklassifikation	141
7.1.2	Genetische Klimaklassifikation.....	144
7.1.3	Klimadiagramme.....	146
7.2	Klimaentwicklung der Erde.....	159
7.2.1	Prähistorische Entwicklung.....	159
7.2.2	Rezente Entwicklung.....	161
7.2.3	Häufigkeiten extremer Klimaänderungen	164
7.2.4	Klimaphänomene	169
7.3	Klimaanalyse.....	179
7.3.1	Klimarekonstruktion.....	179
7.3.2	Klimamessungen	186
7.3.3	Klimawandel	192
7.4	Klimaforschung.....	197
7.4.1	Globale Modelle	200
7.4.2	Regionalmodelle.....	201
7.4.3	Die Entwicklung von Klimamodellen.....	202
7.4.4	Probleme von Klimamodellsimulationen.....	204
7.4.5	Fazit.....	207
7.5	Klimakonferenzen	212
7.5.1	Allgemeine Bemerkungen.....	212
7.5.2	Montrealprotokoll.....	213
7.5.3	Kyoto-Protokoll.....	214
7.5.4	Kopenhagener Vereinbarung.....	218
7.5.5	UN-Klimakonferenz in Durban 2011	219
8	LITERATUR.....	222
9	QUELLEN IM INTERNET.....	225
	GLOSSAR.....	226
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	233

TABELLENVERZEICHNIS	236
ANHANG	237
Größenverhältnisse der Erde	237
Zeitangaben	237
9.1.1 Zonenzeiten	237
9.1.2 Universalzeit (UTC).....	237
Umrechnungen zur Strahlungsmessung	238
Wolkenatlas	238
Übungsaufgaben.....	241
STICHWORTVERZEICHNIS	244

Vorwort

Der vorliegende Lehrbrief wurde auf der Grundlage von Vorlesungen zur Meteorologie vor Studenten der Richtungen Meteorologie und Geophysik des Fachbereiches Physik und der Angewandten Ökologie des Fachbereiches Biologie erarbeitet.

Bemerkungen zum Studienmaterial

Der Autor hat von 1966 bis 1971 an der Universität Rostock Physik studiert. Die Promotion erfolgte 1978 am Maritimen Observatorium der Universität Leipzig mit einem Thema zur turbulenten Struktur des ufernahen Wasserkörpers der Ostsee. Seit 1978 leitet er die Biologische Station des Instituts für Biowissenschaften an der Universität Rostock.

Die Koautorin hat von 1976 bis 1981 am Fachbereich für Meteorologie und Geophysik der Sektion Physik der Humboldt-Universität zu Berlin Meteorologie studiert. Von 1981 bis 1990 arbeitete sie beim Meteorologischen Dienst der DDR, seit 1990 beim Deutschen Wetterdienst in Potsdam, Rostock-Warnemünde, München, Weimar, Essen und Hamburg. Von 1998 bis 2002 folgte ein weiterbildendes Fernstudium als Umweltwissenschaftlerin für Technischen Umweltschutz an der Universität Rostock.

Aufgabe des vorgelegten Materials ist es keinesfalls, aus Ihnen Meteorologen auszubilden. Die Abhandlung führt allgemein in einzelne Teilgebiete der Meteorologie ein und versucht, deren Grundlagen zu vermitteln und einfach darzustellen. Sie gibt einen Einblick über den Aufbau der Erdatmosphäre und die in ihr ablaufenden Prozesse und möchte Sie befähigen, die Ursachen, die den ruhelosen Wechsel des Wetters und die räumlichen und zeitlichen Unterschiede des Klimas bewirken, klar darstellen zu können. Andererseits möchte ich Ihre Empfindlichkeit gegenüber Umweltveränderungen anregen. Nicht selten wird die Meinung vertreten, dass der Mensch vom Wetter immer unabhängiger wird. Aber das trifft keinesfalls zu, wie es die Naturkatastrophen z. B. durch tropische Wirbelstürme belegen. Der Hurrikan Katrina, der im August 2005 über den Bahamas entstand, forderte 1239 Opfer (http://de.wikipedia.org/wiki/Hurrikan_Katrina) und verursachte einen Schaden von 45 Mrd. US Dollar (<http://www.munichre.com/>). Die Zunahme der wetterbedingten Naturkatastrophen drückt sich darin aus, dass ihre Häufigkeit in den Jahren von 1994 bis 2005 beinahe dreimal höher war als in den 1960ern.

Angesichts dessen wird deutlich, dass der Mensch keinesfalls die Natur beherrscht, selbst in Europa nicht. Vor allem aus Energiegründen aber auch aus Gründen des unzureichenden Kenntnisstandes über die in der Atmosphäre ablaufenden Prozesse kann die Umwelt zurzeit nur verändert werden.

Inzwischen wird es immer deutlicher, dass der Mensch zwar nicht „das Wetter machen kann“, aber doch durch sein Handeln das Klima verändert. Dieses als „Globale Klimaerwärmung“ bezeichnete Klimaphänomen hängt eng mit den Emissionen zusammen, die der Mensch z. B. durch die Verbrennung fossiler Energiequellen, das Brandrodren im Regenwald oder die intensive Landwirtschaft zu verantworten hat. Klimaänderungen sind an sich nicht neu: In der erdgeschichtlichen Entwicklung gab es bereits mehrere Klimaänderungen, allerdings ist der derzeit beobachtete Klimawandel zu einem großen Teil menschengemacht und wir wissen, dass sich daraus einschneidende Veränderungen in den Lebensbedingungen ergeben werden. Ein über Jahrzehnte erfolgender Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur könnte zu einer

Verlagerung der Zugbahnen der Zyklonen und der Antizyklonen führen und auch Auswirkungen auf die Meeresströmungen haben (wie z. B. auf die thermohaline Zirkulation (THC)). In der Folge verschieben sich Regen- und Trockenzone der Erde und in einigen Gebieten werden deutlich höhere, in anderen Gebieten deutlich niedrigere Temperaturen auftreten. Damit würde eine Situation wieder hergestellt werden, wie sie zuletzt vor drei bis vier Millionen Jahren geherrscht hat, vor Beginn der ersten Vereisung von Nordamerika und Nordeuropa. Diese Risiken werden heute leider mehr von Fachleuten als von Politikern ernst genommen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass Klimaveränderungen sehr langzeitiger Natur sind, so dass den Ursachen sehr frühzeitig begegnet werden muss, um irreversible Prozesse zu vermeiden.

Für Ihre Arbeit im Umweltschutz ist es sicherlich unabdingbar, Klimaelemente (beispielsweise die Strahlung) messen bzw. bewerten und den Zustand und die Veränderungen in der Atmosphäre richtig interpretieren zu können.

1 Einleitung

1.1 Gegenstand der Meteorologie

Die **Meteorologie** ist die Lehre von den physikalischen Erscheinungen und Vorgängen in der Atmosphäre. Sie steht innerhalb der Geowissenschaften als Physik der Atmosphäre neben der Physik der festen Erde, der Geologie und der Physik der Meere, der Ozeanologie. Die Meteorologie befasst sich hauptsächlich mit den unteren Schichten der Atmosphäre, in denen sich fast alle das Wetter bestimmenden Vorgänge abspielen. Die Beobachtung von Wetter bzw. Klimaerscheinungen geht bis in die Antike zurück (vgl. Tab. 1: Zur Geschichte der Meteorologie).

Wir können vier Teilgebiete in der Meteorologie unterscheiden:

- Allgemeine Meteorologie als Basis für
 - Synoptische Meteorologie und
 - Klimatologie
- Angewandte Meteorologie mit den Bereichen
 - Agrar- und Forstmeteorologie
 - Medizin- oder Biometeorologie
 - Technische Meteorologie (einschließlich Industrie- und Umweltmeteorologie)
 - Maritime Meteorologie
 - Hydrometeorologie
 - Verkehrsmeteorologie (mit Flugmeteorologie)
 - Satellitenmeteorologie
- Theoretische Meteorologie
- Experimentelle Meteorologie

Die **Allgemeine Meteorologie** behandelt den gesamten Grundlagenbereich der Meteorologie. Dazu gehören die verschiedenen meteorologischen Elemente ebenso wie deren gegenseitige Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, die hydrodynamischen und thermodynamischen Prozesse, die für die Bewegungsvorgänge in der Atmosphäre maßgebend sind.

Die **Synoptische Meteorologie** befasst sich mit dem Studium meteorologischer Phänomene, ihrer räumlichen und zeitlichen Änderung auf der Grundlage von Kartendarstellungen gleichzeitig (synoptisch) angestellter Beobachtungen. Es ist im Wetterdienst das Ziel, daraus eine Aussage über die zukünftige Entwicklung des Wetters als Wetterprognose abzuleiten

Die **Klimatologie** ist die Lehre vom Klima und seinen Veränderungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre sowie den durchschnittlichen Ablauf der Witterung an einem Ort oder in einem bestimmten Gebiet der Erdoberfläche charakterisieren. Sie bedient sich statistischer Methoden, die mittlere Verhältnisse, mittlere und extreme Schwankungen, Häufig-

Meteorologie

Allgemeine Meteorologie

Synoptische Meteorologie

Klimatologie

1 Einleitung

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

keitsverteilungen und andere Kenngrößen über eine genügend lange Periode ermitteln können.

Die **Angewandte Meteorologie** ist eine Sammelbezeichnung für die spezialisierten Anwendungsbereiche der Meteorologie. Sie untersucht u. a. die Auswirkung meteorologischer Zusammenhänge auf technische Bereiche, die Einflüsse des Wetters auf Lebewesen bzw. die Biosphäre, die Auswirkungen meteorologischer Gegebenheiten auf den Straßenverkehr, die Schifffahrt und insbesondere die Luftfahrt und sie erforscht den Zusammenhang zwischen dem Wasserkreislauf und der Atmosphäre.

Die **Theoretische Meteorologie** wendet die Methoden der theoretischen Physik auf die Meteorologie an und versucht, Zusammenhänge und Vorgänge in der Atmosphäre aufgrund naturwissenschaftlicher Gesetze durch mathematisch-physikalische Gleichungen zu erfassen. Ein Teilgebiet ist beispielsweise die numerische Wettervorhersage.

Die **Experimentelle Meteorologie** befasst sich mit der Entwicklung, der Theorie und dem Einsatz von Messgeräten und Messverfahren. Dazu gehören u. a. die Radiosondenaufstiege und Satellitenbeobachtungen.

Angewandte
Meteorologie

Theoretische
Meteorologie

Experimentelle
Meteorologie

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

- Das Wetter

Das Wetter ist der Atmosphärenzustand zu einem Zeitpunkt an einem Ort. Er wird gekennzeichnet durch meteorologische Elemente und ihr Zusammenwirken. Zu den Hauptelementen zählen: Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Wind. Von diesen ableitbare Elemente sind: Bewölkung, Niederschlag und Sichtweite. Notwendig zur Erfassung des Wetters ist die Gleichzeitigkeit der Wetterbeobachtungen in einem größeren Gebiet, so dass Luftdruckgebilde, Luftmassen und Fronten bestimmt werden können, um zu einer Wetteranalyse zu kommen.

Wetter

- Die Witterung

Als Witterung bezeichnen wir den Gesamtcharakter eines Wetterablaufes. Darunter versteht man den allgemeinen, durchschnittlichen oder auch vorherrschenden Charakter des Wetterablaufes eines bestimmten Zeitraumes von einigen Tagen bis zu Jahreszeiten (z. B. trockene Sommer). D. h. die Witterung ist das Gleichbleibende in einer Aufeinanderfolge von Wetterzuständen. Die Dauer einer Witterung wird weitgehend durch die vorherrschende Großwetterlage bestimmt. Die Unterscheidungsmerkmale der Witterungstypen werden durch folgende meteorologischen Elemente bestimmt: die vorherrschende Windrichtung (z. B. West), die Strahlungsbilanz (z. B. Hochdruckwetter) und die Vertikalbewegung (z. B. Schauerwetter).

Witterung

1 Einleitung

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

- Das Klima

Das Klima ist die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort der Erdoberfläche über eine genügend lange Periode (z. B. 1961-1990) charakterisieren. Diesen Zustand repräsentieren Mittelwerte (z. B. Monatsmittel der Temperatur), Extremwerte (höchste Windspitze) und Häufigkeitsverteilungen (z. B. absolute Häufigkeit für das Auftreten von Sturmhochwassern) langjähriger Beobachtungen und Messungen. Zu grundlegenden Klimaparametern gehören unter anderem die Solarkonstante, die Strahlungsbilanz und die Bewegungsenergie der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre. Das Klima berücksichtigt die geographische Breite, die Höhe über dem Meeresspiegel (NN) und die Entfernung zum Meer bzw. zum Ozean.

Klima

- Das klimatische System

Zum klimatischen System gehören alle Faktoren, die untereinander und mit der Atmosphäre in Wechselwirkung stehen. Neben der Atmosphäre selbst gehören dazu der Kosmos, die Lithosphäre, die Biosphäre, die Hydrosphäre, die Kryosphäre und die Ozeanosphäre. Bei der Klimamodellierung besteht die Herausforderung darin, möglichst viele dieser Einflussfaktoren mit einzubeziehen. Bei den Weltmeeren (Ozeanosphäre), der Hydrosphäre (z. B. klimatische Wasserbilanz, Wolkenbildung, Grundwasserhaushalt) und kosmischen Einflüssen (Solarkonstante, Sonnenfleckenzyklus) wurden bereits erste Ergebnisse erzielt.

Klimatisches System

Tab. 1: Zur Geschichte der Meteorologie

um 350 v. Chr.		Der griechische Philosoph Aristoteles hat als erster in seinen vier Büchern der "Meteorologica" (fast 2000 Jahre das fundamentale Werk der Meteorologie) die atmosphärischen Erscheinungen und die bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Erkenntnisse über Wetterphänomene beschrieben. Neben dem Wetter ging er auch auf Kometen und andere Himmelsereignisse ein. Er prägte viele Fachbegriffe, die heute noch verwendet werden, wie z. B. „Trombe“, „Taifun“. Der griechische Begriff "meteoros" bedeutet "in der Luft schwebend".
3./4. Jh. v. Chr.		Ein Regenmesser, wie er in einer indischen Schrift aus dem 3./4. Jahrhundert v. Chr. beschrieben wird, und der antike Athener „Turm der Winde“, ein Oktogon mit Windfahne und einer Wasseruhr im Inneren, gelten als die ältesten (bekanntesten) meteorologischen Hilfsmittel.
		Bis übers Mittelalter bestand Wetterkunde aus Beschreibungen, z. B. von Seefahrern, und aus Bauernregeln. Es gab nur Windfahnen und Regenmesser. Es fehlten richtige Messinstrumente.

1 Einleitung

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

1592		Galileo Galilei erfindet das Quecksilberthermometer.
1643		Dessen Schüler Evangelista Torricelli baut das erste Barometer.
1654		Der toskanische Adelige Großherzog Ferdinand II. errichtet ein erstes Netz von Wetterstationen, das bis 1670 in Betrieb war.
1654-1657		Otto v. Guericke baut ein Wasserbarometer und weist mit den berühmten Magdeburger Halbkugeln die Existenz des Luftdruckes nach.
17. Jh.		Erste meteorologische Beobachtungsstationen in Italien, Deutschland, Frankreich, Polen und Schweden.
1780		Aufbau eines Beobachtungsnetzes mit gleichen Instrumenten und standardisierten Messungen um 7, 14 und 21 MOZ („Mannheimer Stunden“) durch die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft. Bis 1795 Messungen an 39 Stationen rund um den Globus.
1781		Beginn der weltweit längsten ununterbrochenen Messreihe einer Bergwetterstation auf dem Hohenpeißenberg in Oberbayern.
1816		Heinrich Wilhelm Brandes zeichnete nach Wetterbeobachtungen aus dem Jahre 1783 die ersten Wetterkarten. Er wurde zum Begründer der synoptischen Methode, d. h. einer vergleichenden Zusammenschau von Wetterbeobachtungen eines gleichen Beobachtungstermins.
1832		Die Erfindung des Telegraphen durch Gauß und Weber sowie des in der Praxis verwendbaren Schreibtelegraphen durch Morse machten die Zusammenstellung aktueller Wetterdaten erstmalig auf der Londoner Weltausstellung von 1851 für zwei Monate möglich
1847		Gründung des Preußischen Meteorologischen Instituts in Berlin
1863		Der Brite Sir Francis Galton entwickelte die ersten Wetterkarten mit Isobaren (Linien gleichen Luftdruckes) und entdeckt erstmalig Hochdruckgebiete. Veröffentlichung seiner Ergebnisse in dem Buch „Meteorographica“.
1868		Gründung der Norddeutschen Seewarte in Hamburg
1873		Erste Wetterkarte in der „Times“. Gründung der Internationalen Meteorologischen Organisation (IMO) in Wien.
1876		Erstellung einer täglichen Wetterkarte durch die Deutsche Seewarte in Hamburg (gegründet 1872).
1878		Erste regelmäßige Wettervorhersagen in Deutschland durch das sächsische „Meteorologische Bureau für Prognosewesen“.
um 1900		Internationale Vereinbarungen und die Erfindung der drahtlosen Telegraphie ermöglichten den Aufbau eines globalen Wetterfunkdienstes.

1 Einleitung

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

1901		Fritz Berson und Reinhard Süring erreichen mit einem Ballon und Messinstrumenten erstmals fast elf Kilometer Höhe (Beginn der „Aerologie“).
1926		Die Deutsche Seewarte versucht, Wetterkarten per Bildfunk zu „faxen“.
1934		Gründung des Reichswetterdienstes
1950		Gründung des Meteorologischen Dienstes der DDR
1951		Gründung der Weltorganisation für Meteorologie (engl. <i>World Meteorological Organization (WMO)</i>) als Nachfolgeorganisation der IMO. Sie ist die Spezialorganisation der Vereinten Nationen (UN) für Meteorologie, angewandte Hydrologie und verwandten Geowissenschaften.
1952		Der Deutsche Wetterdienst (DWD) wird gegründet und übernimmt die Erstellung und Analyse von Wetterkarten in Deutschland.
1954		Beitritt der BRD zur WMO
1960		Der erste polarumlaufende Satellit, der rein meteorologischen Zwecken diente, war der amerikanische TIROS-1. Die Serie heißt heute POES.
1961		Erstmals Empfang von Satellitenbildern im DWD und Beginn der weltweiten lückenlosen Beobachtung der Wolkenbedeckung.
1964		Der DWD beginnt mit der Messung des Gesamtzons in der Atmosphäre.
1966		Beginn der numerischen Wettervorhersage im DWD.
1970		Die NASA startet den ersten polarumlaufenden Satelliten der NOAA-Serie.
1975		Der erste geostationäre Satellit vom GOES-Typ (NASA) wird gestartet.
1975		Gründung des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW; engl. <i>ECMWF = European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>) in Shinfield Park bei Reading (England), um 10-tägige Vorhersagen erstellen zu können.
1977		Der erste geostationäre Satellit der METEOSAT-Reihe wird von der ESA ins All gestartet.
1986		Gründung von EUMETSAT (<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i> , deutsch: „Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten“) in Darmstadt; zwischenstaatliche Organisation von insgesamt 25 europäischen Staaten; betreibt die Meteosat- und MetOp-Wettersatelliten
1988		Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) rufen im November den „Weltklimarat“ (<i>IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change</i>) ins Leben. Seine Haupt-

1 Einleitung

1.2 Einteilung der meteorologischen Erscheinungen

		aufgabe ist es, Risiken der globalen Erwärmung zu beurteilen sowie Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zusammenzutragen.
1995		Das EZMW beginnt mit einem experimentellen Programm zur Jahreszeitenvorhersage.
2005		Eröffnung des Wetterparks in Offenbach.
2009		Der DWD betreibt seit März 2009 einen NEC SX-9-Hochleistungscomputer mit einer Spitzenleistung von 109 teraFLOPS (10^{12} Flops), um Wettervorhersagen zu berechnen.
April 2010		Start des Satelliten CRYOSAT 2 zur Messung der Dicke von Meereis- und Landeis Massen aus 720 km Höhe
2013		Der DWD kauft bei Cray in Seattle zwei Supercomputer XC30 mit einer Rechenleistung von bis zu 100 Petaflops (PETA = 10^{15} ; FLOP=Gleitkommaoperationen pro Sekunde), deren Einführung für 2013 und 2014 vorgesehen ist.
2016		Europa plant den Start der MTG (METEOSAT 3. Gener.)

2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre

Zur Beschreibung des Aufbaus der Atmosphäre ziehen wir unterschiedliche Parameter heran. Neben dem Druck, dem Molekulargewicht, der Ionendichte und dem Wind ist es vor allem die Temperatur.

2.1 Molekularer Aufbau der Atmosphäre

Atmosphären sind keinesfalls eine Selbstverständlichkeit für einen Himmelskörper, wie es beispielsweise für den Mond zutrifft. Die Antwort, warum die Erde eine Lufthülle besitzt, gibt die kinetische Gastheorie. Danach bewegen sich die Teilchen eines Gases umso schneller, je höher ihre Temperatur ist. Bei gleicher Temperatur fliegen die schweren Teilchen langsamer und die leichten schneller. Bei 0°C gilt in der kinetischen Gastheorie für die mittlere **Molekulargeschwindigkeit** für Wasserstoff H₂: 1839 m/s, für Sauerstoff O₂: 462 m/s und für Kohlendioxid CO₂: 236 m/s. Entspricht die Geschwindigkeit des Gasteilchens der **Fluchtgeschwindigkeit** für die Erde (am Äquator 11,2 km/s), so kann es in den Weltraum entweichen. Die trockene Atmosphäre (ohne Wasserdampf, feste und flüssige Partikel) besteht aus einem Gasgemisch, dessen Hauptbestandteile Stickstoff N₂ (78,084 Vol.-%) und Sauerstoff O₂ (20,9476 Vol.-%) insgesamt 99,0316 Vol.-% ausmachen. Da die Atmosphäre in ständiger Bewegung ist und auch eine dauernde Durchmischung erfährt, bleibt das mittlere Molekulargewicht der trockenen Luft mit einem fiktiven Wert von 28,964 g/mol vom Boden bis in ca. 70 bis 100 km Höhe konstant. Diese Schicht völliger Durchmischung wird **Homosphäre** genannt und umfasst praktisch die Troposphäre, die Stratosphäre und die Mesosphäre. Sie wird von der **Homopause** abgedeckt. Ab ca. 100 km Höhe nimmt das Molekulargewicht der Luft markant ab, da der Volumenanteil der Gase mit großem Molekulargewicht schneller abnimmt als der mit geringerem. Bei abnehmender Luftdichte und damit immer größeren freien Weglängen zwischen den Zusammenstößen der Atome und Molekülen gewinnt die molekulare Diffusion immer mehr an Bedeutung. Die vorher einheitliche Gasmasse ändert ihre Zusammensetzung, da die verschiedenen Gaskomponenten nach ihren eigenen hydrostatischen Grundgleichungen mit der Höhe abnehmen. Der Übergang von der turbulenten zur molekularen (atomaren) Diffusion erfolgt in der Atmosphäre in einer Höhe von etwa 100 km. Mit zunehmender Höhe nimmt damit in der Luft der Anteil der Gaskomponenten mit niedrigerem Molekular- oder Atomgewicht zu. In der Homosphäre überwiegt noch der Stickstoff N₂ (**Molekulargewicht** 28). In 250 km Höhe überwiegt der Sauerstoff O (**Atomgewicht** 16). Bei dem großen Abstand der Gasteilchen und den geringen Temperaturen in diesen Höhen können die zu Atomen **dissoziierten Moleküle** sich nicht mehr vereinigen. Oberhalb von 800 km überwiegt Helium He (Atomge-

Molekulargeschwindigkeit

Fluchtgeschwindigkeit

Homosphäre

Molekulargewicht

dissoziierte Moleküle

wicht 4) und ab 2500 km Wasserstoff H (Atomgewicht 1). Die Schicht oberhalb 100 km, in der sich die Gase entmischen, heißt **Heterosphäre**.

Heterosphäre

2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre

In der gesamten Erdatmosphäre existieren drei **Wärmeschichten** mit entsprechenden **Temperaturmaxima**:

Wärmeschichten

- die untere Wärmeschicht, die Erdoberfläche, nimmt Wärme durch Absorption zwischen 300 und 500 nm auf und gibt diese durch Turbulenz und Strahlung an die (untere) Atmosphäre ab,
- die mittlere Wärmeschicht nimmt Wärme durch Absorption von UV (ultraviolett) - Strahlung bei 50 km Höhe auf,
- die obere Wärmeschicht nimmt Wärme oberhalb 100 km durch Absorption von EUV (extrem UV) - Strahlung auf.

Die Ergebnisse direkter und indirekter Methoden lassen erkennen, dass die Atmosphäre aus fünf verschiedenen Schichten aufgebaut ist:

- Troposphäre

Die unterste Schicht wird als **Troposphäre** (Abb. 1) oder Vermischungszone bezeichnet. In ihr existieren ausgeprägte Vertikalbewegungen, die zur Durchmischung der Luft führen. Obwohl sie nur eine relativ dünne Schale um die Erdoberfläche bildet, enthält sie 3/4 der Masse und fast den gesamten Wasserdampf der Atmosphäre (ca. 99 %). Darum treten in ihr auch alle Erscheinungen auf, für die der Wasserdampf erforderlich ist, wie Wolken und Niederschläge. Die Troposphäre erhält dadurch die Bedeutung einer **Wettersphäre**. Der Druck fällt von 1013 hPa (Normaldruck) in Meeresspiegelhöhe auf 225 hPa in 11 km Höhe. Die (feuchtadiabatische) Temperaturabnahme mit der Höhe beträgt im Mittel 0,65 K/100 m, die trockenadiabatische etwa 1 K/100 m (s. Föhn). Als Ursache ist anzusehen, dass die Troposphäre überwiegend von der Erdoberfläche her erwärmt wird.

Troposphäre

Wettersphäre

Unmittelbar über dem Boden liegt die Reibungsschicht oder planetarische Grenzschicht, in der die Atmosphäre direkt von den Verhältnissen an der Erdoberfläche beeinflusst wird. In ihr herrschen Reibung und somit Vertikalbewegung oder **Konvektion** vor. Sie reicht - je nach Untergrund - bis in etwa 500 bis 1500 m Höhe. Für mikroklimatische Untersuchungen ist die Unterteilung dieser atmosphärischen Grenzschicht in drei Abschnitte unterschiedlicher Mächtigkeit bedeutsam: die laminare Unterschicht bis etwa 1 m, die Prandtl-Schicht bis rund 60 bis 100 m und die Ekman-Schicht bis ca. 500 bis 1000 m Höhe.

Konvektion

In der **laminaren Unterschicht** wird der Wärmetransport von molekularen Vorgängen bestimmt, so dass die Strömung laminarer, d. h. nicht turbulenter Natur ist.

Laminare Unterschicht

2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre
 2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre

In der Boden- oder **Prandtl-Schicht** nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe schon auf etwa 70 bis 80 % der Geschwindigkeit des reibungsfreien Windes zu, ohne allerdings seine Richtung wesentlich zu ändern. Die Strömung in dieser Schicht ist turbulent. Es herrscht eine annähernd logarithmische Windverteilung mit der Höhe. Danach nimmt die in 10 m gemessene Windgeschwindigkeit nach unten bis in 1 m Höhe genau so viel ab, wie sie nach oben bis in 100 m Höhe zunimmt.

Prandtl-Schicht

In der Ober- oder **Ekman-Schicht** dreht der Wind mit der Höhe bei nur noch geringer Zunahme in Form einer **Ekman-Spirale** nach rechts, bis er sich an der Obergrenze dieser Schicht allmählich dem ungestörten **Gradientwind** anpasst.

Ekman-Schicht

Oberhalb dieser Schicht liegt als Deckschicht - die **Peplopause** oder Mantelschicht. Infolge abnehmenden Reibungseinflusses überwiegt dann die Horizontalbewegung oder **Advektion** gleichzeitig nimmt die Stärke der Konvektion mit zunehmender Höhe ab. Die auf die Peplopause folgende Schicht wird daher auch als **Advektionsschicht** bezeichnet.

Peplopause

Advektion

Die Obergrenze der Troposphäre, die **Tropopause** schwankt in ihrer Höhe zwischen etwa 8 km am Pol und 17 km in den Tropen. In den gemäßigten Breiten beträgt ihre Höhe durchschnittlich 11 km. Die Temperatur der Tropopause beträgt am Pol -45°C , am Äquator -80°C und in gemäßigten Breiten -50 bis -60°C . Die Höhe der Tropopause zeigt einen Jahresgang, der am Äquator gering und am Pol stark ausgeprägt ist.

Tropopause

- Stratosphäre

Das zweite Stockwerk der Atmosphäre ist die **Stratosphäre** oder Schichtenzone. Sie reicht bis 50 km Höhe (Stratopause) und in ihr sind kaum Vertikalbewegungen vorhanden. In dieser Sphäre sind nur geringe Mengen von Wasserdampf vorhanden, so dass Wolken nur selten vorkommen. Dafür gibt es in günstigen Lagen eine Art orographische Wolken: die irisierenden, so genannten Perlmutterwolken in 23 bis 28 km Höhe. Sie entstehen an den Wellenbergen von Wellen, die sich in Europa z. B. an den norwegischen und schottischen Bergen bilden. Sie treten nur bei sehr tiefen Stratosphärentemperaturen unter -82°C durch Sublimation des Wasserdampfes auf.

Stratosphäre

Ein besonderes Merkmal der Stratosphäre ist die **Ozonschicht** ab 20 km Höhe. **Ozon** ist ein drei Atome enthaltendes Sauerstoffmolekül. Es wird durch photochemische Prozesse in 20 bis 30 km Höhe durch den kurzwelligen Anteil der Ultraviolettstrahlung der Sonne gebildet. Diese Absorption der UV-Strahlung bestimmt weitgehend die Temperaturverteilung der Stratosphäre. Weil die obersten Schichten der Ozonschicht den größten Teil an eintreffender UV-Strahlung absorbieren, bleibt für die darunter liegenden Schichten immer weniger an UV-Strahlung übrig. Durch die

Ozon

Ursachen bedingt, fällt das Maximum der Erwärmung der Stratosphäre nicht mit dem Maximum der Konzentration des Ozons zusammen.

Stichwort: Ozonmessung:

Die Messung des Ozons erfolgt mit so genannten Ozonspektrophotometern. Die Einheit, in denen die Menge des in der Atmosphäre vorhandenen Ozons angegeben wird, heißt **Dobson Unit (DU)**. Sie wurde nach dem Pionier der Messtechnik für atmosphärisches Ozon Gordon Dobson benannt, der das Dobson-Spektrophotometer erfand. Die Ozonmenge in DU ist die gesamte Menge an Ozon, die man in einer Säule vorfindet, die aus der Atmosphäre "herausgeschnitten" wurde. Dabei ist die Säule so gedacht, als reiche sie vom Erdboden bis zur Oberkante der Atmosphäre. Sie enthält also auch die geringsten Mengen an Ozon in der Troposphäre, die beim Sommersmog eine wichtige Rolle spielen. Zur Angabe der Ozonmenge in DU stellt man sich weiter vor, dass das Ozon in der Säule so weit nach unten gedrückt würde, bis es sich über dem Erdboden in einer Schicht ansammeln würde, in der es unter dem Druck von 1024 mbar, also dem normalen Atmosphärendruck, stehen würde. Die Höhe dieser Schicht liefert dann den Zahlenwert für die Ozonmenge in DU. Um auf bequeme Zahlen zu kommen, wurde festgesetzt, dass eine Höhe der imaginären Schicht von einem Millimeter gerade 100 DU entsprechen. Im Mittel kommt Ozon in einer Konzentration von etwa 330 DU in der Atmosphäre vor. Würde man also alles Ozon über unseren Köpfen auf dem Erdboden unter einem Druck von einer Normalatmosphäre (1013 mbar) und bei einer Temperatur von 273 K (0°C) ansammeln können, würde sich ein "Ozon-Ozean" von nur (!) etwa 3 mm Höhe (genau: 3,3 mm) ergeben! Gelegentlich findet man anstelle der Einheit DU auch die Angabe matm-cm (sprich: milli-Atmosphäre Zentimeter). Dabei sind 300 matm-cm gerade 0,3 atm-cm oder 3 atm-mm, was wieder eine 3 mm dicke Schicht bei einem Druck von 1 atm (Bodenluftdruck) bedeutet. Die Einheit DU entspricht also der Einheit matm-cm. Rechnet man die Ozon-Menge 1 DU in die über einem Quadratzentimeter Grundfläche vorhanden Anzahl von Molekülen Ozon um, so ergibt sich, dass sie äquivalent zu $2,69 \cdot 10^{16}$ Molekülen pro cm^2 ist (26,9 Millionen mal 1 Milliarde Moleküle pro cm^2).

Stichwort „Ozonloch“

Als **Ozonloch** wird die geographisch abgegrenzte Abnahme der Ozonschicht bezeichnet, die seit Ende der 1970er Jahre zunächst nur über der Südpolarregion, später (1992) auch über der Nordpolarregion beobachtet wurde.

Als Ursache des Ozonabbaus werden mehrheitlich gasförmige Halogenverbindungen verantwortlich gemacht. Diese sind insbesondere manche als Treibgas oder Gefriermittel eingesetzte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). 1985 wurde das Ozonloch erstmals über der Antarktis nachgewiesen.

Der Abbau der Ozonschicht hat negative Folgen für Mensch und Umwelt, da UV-Strahlung nicht mehr in vollem Umfang absorbiert wird.

Ozonmessung

Dobson Unit

Ozonloch

2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre

2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre

In der oberhalb der Troposphäre liegenden Stratosphäre (ab ca. 12 km) sammeln sich ozonschädigende Gase. Aufgrund von unterschiedlichen Temperaturverhältnissen in beiden Schichten der Atmosphäre können in die Stratosphäre gelangte Stoffe nicht mehr weiter transportiert werden. Die Grenzregion zwischen Stratosphäre und Troposphäre bildet eine Barriere (Tropopause).

Die in die Stratosphäre eingetragenen Stoffe reagieren mit dort befindlichem Ozon. Dieses wird aufgespalten und in differierende chemische Verbindungen überführt. Die Menge des Ozons in der Ozonschicht der Stratosphäre verringert sich und sie kann ihre schützende Funktion zunehmend weniger erfüllen.

Im wissenschaftlichen Fachdiskurs existierten von Beginn an verschiedene Erklärungsansätze des so genannten "Ozonlochs". Die heute vorherrschende Position, dass der Ozonabbau größtenteils anthropogene Ursachen hat (etwa die FCKW-Emissionen, die durch das Montreal-Protokoll kontrolliert werden sollen – siehe auch Kap. 7.5.1), war zu Beginn der Kontroverse sehr umstritten.

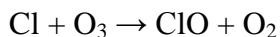
Heute hat sich das Verhältnis umgekehrt: Die Erklärung, dass durch natürliche Vorgänge (z. B. Vulkanausbrüche) größere Mengen an Halogenverbindungen in die Stratosphäre gelangen, ist umstritten und noch nicht schlüssig nachgewiesen. Inzwischen gilt diese Meinung sogar als widerlegt (WMO 2003).

Der Ablauf des Ozonabbaus sei hier beispielhaft an Chlor dargestellt; allerdings reagieren auch andere Halogene (Fluor, Brom) sowie diverse molekulare Radikale (z. B. Stickstoffmonoxid NO) auf diese oder ähnliche Weise.

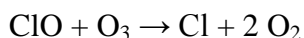
Zunächst werden die FCKW durch die UVB-Strahlung aufgespalten und es entstehen Halogen-Radikale ($R = \text{Molekülrest}$).



Dieses Chlorradikal entzieht dem Ozon eines seiner Sauerstoffatome und reagiert damit zu ClO:



ClO ist selbst wieder ein Radikal; trifft dies nun auf ein weiteres Ozonmolekül, wird diesem ebenfalls ein Sauerstoffatom entzogen und es entstehen zwei Sauerstoffmoleküle, das Chlorradikal wird wieder frei und steht für weitere Reaktionen zur Verfügung:



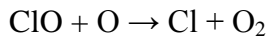
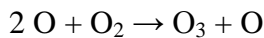
Ozon wird auf diese Weise in normalen molekularen Sauerstoff O_2 umgewandelt. Bei dieser Reaktion tritt das Chloratom nur als Katalysator auf, ein Chloratom kann deshalb bis zu 100.000 Ozonmoleküle zerstören.

Dies ist der hauptsächliche Abbauzyklus; daneben laufen jedoch noch vielfältige weitere Reaktionen ab, die ebenfalls zur Schädigung der Ozonschicht beitragen bzw. diese unterstützen, wie z. B. die Reaktion von Halogenoxiden mit Sauerstoffradikalen:

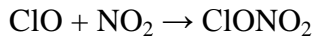
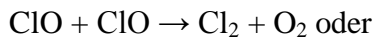


2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre

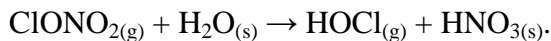
2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre



Ein Chlornradikal kann den katalytischen Zyklus viele Male durchlaufen und dabei bis zu 100.000 Ozonmoleküle zerstören. Der Zyklus kann nur abgebrochen werden, wenn zwei Radikale miteinander reagieren und so genannte Reservoirspezies bilden:



Unter den besonderen Bedingungen der Polarnacht, d. h. Finsternis und sehr tiefe Temperaturen, können sich die Reservoirspezies zu beachtlichen Konzentrationen ansammeln. Durch die Kälte können sich einige Substanzen in der Stratosphäre verflüssigen und sogar gefrieren. Es entstehen Polare Stratosphärenwolken (Polar Stratospheric Clouds, PSC), die für die Entstehung des Ozonlochs von großer Bedeutung sind. An den Kristallen der PSC laufen Reaktionen ab, bei denen Stickstoffoxide aus der Luft in die Kristalle übergehen, so dass nur die weitaus aggressiveren Chlorverbindungen in der Luft bleiben:



(g bedeutet gasförmig, s (von solid) bedeutet fest)

Wenn zum Ende der Polarnacht die Sonne aufgeht, werden diese Chlorverbindungen vom UVB-Licht gespalten und plötzlich stehen sehr viele freie Chlornradikale zur Verfügung, die Ozonmoleküle zerstören können. Erst nach und nach verdampfen die PSC und bringen die Stickstoffverbindungen zurück in die Luft, die mit den Chlornradikalen neue Reservoirspezies bilden und so den Ozonabbau dämpfen können.

Seit 1996 ist die Zerstörung der Ozonschicht neuen Messungen zufolge (Messzeitraum 1978 bis 2002) nicht weiter vorangeschritten, was sich besonders mit ersten Erfolgen des Montreal-Protokolls erklären lässt. Dennoch wurde im Jahre 2005 über der Antarktis jedoch der dritthöchste je gemessene Stand des Ozonlochs nach 2000 und 2003 ermittelt und erst die nächsten Jahre werden zeigen, ob tatsächlich eine nachhaltige Verbesserung eingetreten ist.

Der Grund für das größere Ozonloch am Südpol im Vergleich zum Nordpol, liegt in der Form des antarktischen Kontinents begründet. In der Polarnacht, wenn keine Sonnenstrahlung auf die Erde fällt, bildet sich ein Kaltluftgebiet, der so genannte „Polarwirbel“. Da der antarktische Kontinent im Wesentlichen rund ist und kaum höhere Gebirge aufweist, wird der Polarwirbel an seinen Rändern auch nur wenig gestört. In seinem Inneren können sehr tiefe Temperaturen erreicht werden (bis unter 188 K, das entspricht -85°C). Am Nordpol sind die Verhältnisse insofern anders, als der entstehende Polarwirbel durch die Überströmung der Gebirge der hohen nördlichen Breiten gestört wird. Wärmere Luft wird turbulent eingemischt und die Temperaturen können nie soweit absinken, wie für die Entstehung von PSC nötig wäre. Ohne PSC können aber die Stickstoffverbindungen

dungen nicht aus der Luft entfernt werden und der Ozonabbau bei Sonnenaufgang wird wesentlich gedämpft.

Wegen der Zerstörung der Ozonschicht gelangt mehr UV-Licht auf die Erdoberfläche, was beim Menschen zu Hautschäden bis hin zum Hautkrebs führen kann. Bei fehlender Ozonschicht droht durch kurzwellige UV-Strahlung sogar Erblindung innerhalb weniger Stunden. Langzeitschäden wie Hautalterung, Hautkrebs oder Katarakt können auch auftreten, wenn die Erythemschwelle, ab der entzündungsbedingt Hautrötungen auftreten, zwar nicht überschritten wird, die Bestrahlung aber häufig erfolgt. Haut und Augen registrieren **jede** UV-Strahlung und nicht nur diejenige, die über der Erythemschwelle liegt.

Mittlerweile wird die weltweite Ausdünnung der Ozonschicht durch Satellitenüberwachung gemessen. Bisher dachte man, dass sich das Ozonloch bis 2040 wieder geschlossen haben wird. Doch inzwischen geht man davon aus, dass es sich erst 2065 schließt.

Stichwort „Bodennahes Ozon“

Ozon ist ein Reizgas und kommt auch in Bodennähe als Folgeprodukt der Emission von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen vor. Die Belastung der bodennahen Luft mit Ozon wird auch als **Sommersmog**, Photosmog, Ozonsmog oder L.A.-Smog bezeichnet. Er tritt bei sonnigem Wetter auf und entsteht aus Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit der UV-Strahlung der Sonne. Bodennahes Ozon wirkt vor allem auf die Atemwege und kann zu Beeinträchtigungen der Lungenfunktion führen. Subjektive Befindlichkeitsstörungen wie Tränen- und Hustenreiz sowie Kopfschmerzen können ebenfalls auftreten. Darüber hinaus gibt es Erkenntnisse, dass Ozon allergische Reaktionen fördert und zur Tumorbildung beitragen kann.

Pflanzen reagieren teilweise sehr sensibel auf Ozon. Die sommerliche Ozonbelastung kann vor allem an den Blättern von Laubbäumen, Sträuchern und Kulturpflanzen zu sichtbaren Schäden führen. Bei Dauerbelastung kann das Wachstum und die Vitalität empfindlicher Pflanzenarten beeinträchtigt werden.

Die Hauptquellen für die Vorläufersubstanzen der bodennahen Ozonbildung liegen in den urbanen Ballungsgebieten und sind der Straßenverkehr, Industrie- und Kraftwerksanlagen, Gewerbe und private Haushalte. Der Straßenverkehr spielt insbesondere bei den Emissionen von Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen eine große Rolle. Daher kommt es gerade dort bei sommerlichen Schönwetterperioden tagsüber immer wieder zu erhöhter Ozonbildung. Dieses Ozon gelangt durch Transportvorgänge in Stadtrandgebiete und den ländlichen Raum. Der Abbau von Ozon erfolgt primär nachts, aber auch parallel zu seiner Bildung, denn durch frisch emittiertes Stickstoffmonoxid findet dabei im Nahbereich hoher Verkehrsbelastung ein Ozonabbau statt. In den Stadtrandgebieten und im ländlichen Raum fehlen hingegen die Vorläufersubstanzen. Als Folge des-

bodennahes Ozon

Sommersmog

2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre

2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre

sen bleibt das Ozon hier zunächst weitgehend erhalten. Die mittlere Ozonbelastung ist daher auf dem Land höher als in den Ballungsgebieten. Die Ozonkonzentrationen unterliegen auf Grund der Bildungs- und Abbauprozesse einem ausgeprägten Tagesgang. Dies bedeutet, dass die Konzentrationen normalerweise morgens zunächst niedrig sind, dann stetig ansteigen und in den Nachmittagsstunden, meist zwischen 16 und 17 Uhr, ihr Maximum erreichen. Am Abend ist dann mit einem Rückgang der Werte zu rechnen. Weitere Ozonquellen sind Laserdrucker, Photokopier- und Faxgeräte, die durch Entladung Ozon freisetzen. Auch durch Blitze entsteht Ozon.

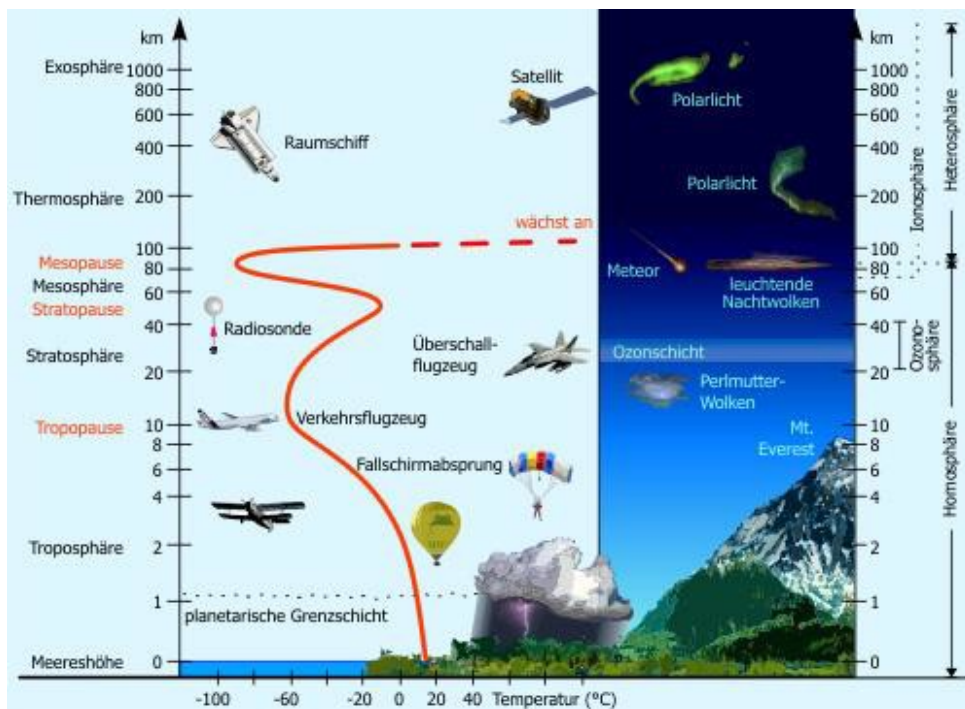


Abb. 1: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre und mittlere Temperaturverteilung

Das Temperaturmaximum der Atmosphäre von rund 0°C oder darüber liegt zwischen 47 und 51 km Höhe in der **Stratopause**. Die Stratosphäre ist von der Temperaturverteilung her in drei Schichten geteilt:

- **isotherme Schicht** (von etwa -60°C) von 11 km bis 20 km,
- Schicht geringer Temperaturzunahme von $1,0\text{ K/km}$ bis 32 km Höhe,
- Schicht rascher Temperaturzunahme von $2,8\text{ K/km}$ bis ca. 50 km Höhe (Tab. 2).

Da die Aufheizung der Atmosphäre vom **Einfallswinkel der Sonne** abhängig ist, weisen die Stratosphärentemperaturen einen ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter auf. Infolge der ununterbrochenen Einstrahlung im Polargebiet auf der

Stratopause

isotherme Schicht

2 Vertikaler Aufbau der Atmosphäre
 2.2 Thermischer Aufbau der Atmosphäre

Sommerhalbkugel und ihres völligen Fehlens auf der Winterhalbkugel liegt das Temperaturmaximum der Stratopause beim jeweiligen Sommerpol und das Minimum beim Winterpol, so dass sich ein über den Äquator hinweg reichendes Temperaturgefälle vom Sommer- zum Winterpol ergibt.

Tab. 2: Thermischer Aufbau der Atmosphäre

Schicht	Höhe km	Temperatur		- Gradient
		° C	K	
Troposphäre	0	15,0	288,2	- 6,5
	11	- 56,5	216,7	
Tropopause	11	- 56,5	216,7	
Stratosphäre	11	- 56,5	216,7	0,0
	20	- 56,5	216,7	+ 1,0
	32	- 44,5	228,7	+ 2,8
	47	- 2,5	270,7	
Stratopause	47-51	- 2,5	270,7	
Mesosphäre	51	- 2,5	270,7	
	71,8	- 58,5	214,7	- 2,8
	86	- 86,3	186,9	- 2,0
Mesopause	86-91	- 86,3	186,9	
Thermosphäre	91	- 86,3	186,9	nichtlineare Temperaturfkt.
	500	726,1	999,2	
Exosphäre	500	726,1	999,2	0,0
	1000	726,9	1000	

- Mesosphäre

Ähnlich wie die Troposphäre ist auch die **Mesosphäre** durch einen negativen Temperaturgradienten gekennzeichnet, der aber beträchtlich geringer ist und bis in eine Höhe von etwa 85 km ungefähr -90°C erreicht. Das Ende der Mesosphäre, die **Mesopause**, weist die tiefsten Temperaturen der Atmosphäre auf. Die tiefste bisher bekannte Temperatur der Atmosphäre von -153°C wurde am 17. Juni 1966 in Point Barrow (Alaska) bei einem Raketenanstieg in 93 km Höhe gemessen. Die tiefsten sommerlichen Mesopausentemperaturen der höheren Breiten reichen für eine Übersättigung des zwar nur in geringen Spuren vorhandenen Wasserdampfes aus, so dass sich dort Eiskristalle bilden können. Diese werden vor der Morgendämmerung und nach der Abenddämmerung, wenn die Erdoberfläche Nacht hat, infolge ihrer großen Höhe schon oder noch von der Sonne angestrahlt und leuchten hell auf. Diese sehr dünnen Wolken-schleier werden daher **leuchtende Nachtwolken** genannt. Sie treten golden oder rotbraun nahe dem Horizont auf, gehen aber höher am Himmel allmählich in blau-weiß über und erscheinen nahe dem Zenit blaugrau. Bei den höheren winterlichen Mesopausentemperaturen sind diese Wolken nicht zu beobachten.

Mesosphäre

Mesopause

leuchtende Nachtwolken

- Thermosphäre

Die **Thermosphäre** stellt eine Schicht über der Mesosphäre, die von zunehmender Temperatur mit der Höhe gekennzeichnet ist. Der Temperaturanstieg kommt hauptsächlich durch Absorption von EUV-Strahlung in den oberen Atmosphärenschichten zustande. Bei der geringen Anzahl von Gasteilchen in der Volumeneinheit in diesen Höhen bezieht sich der Begriff Temperatur nicht mehr auf die gemessene fühlbare Wärme, sondern auf die mittlere kinetische Energie der dort vorhandenen Luftmoleküle.

Thermosphäre

- Exosphäre

Die äußere oder **Exosphäre** stellt den Übergang zum Weltall dar. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die mittlere freie Weglänge ihrer Gasteilchen (Wegstrecke zwischen zwei Zusammenstößen von Gasatomen oder Gasmolekülen) so groß wird, dass sie praktisch nicht mehr zusammenstoßen. In 500 km Höhe beträgt die freie Weglänge über 30 km. Bei genügend großer Geschwindigkeit können die Gasteilchen den Anziehungsbe- reich der Erde verlassen, falls sie nicht durch magnetische Kräfte daran gehindert werden.

Exosphäre

2.3 Elektrischer Aufbau der Atmosphäre

In den Höhen oberhalb der Mesopause werden anstelle der nur schwer zu bestimmenden und sehr stark schwankenden Temperatur die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Luft für die Gliederung der Atmo- sphäre verwendet. So bezeichnet man die Schichten, in denen der Zustand der Luft durch Ionisation gekennzeichnet ist, als **Ionosphäre**:

- Ionosphäre

Bei der **Ionisation** wird aus neutralen Atomen oder Molekülen je ein (ne- gativ geladenes) **Elektron** abgespalten und es bleibt ein (positiv gelade- nes) **Ion** zurück. Ursache sind die solare UV - und Röntgenstrahlung so- wie die kosmische Strahlung und die radioaktive Strahlung der obersten Bodenschicht. Bei großer Luftdichte und darum geringer **freier Weglänge** haben die Ionen nur eine kurze **Lebensdauer**. Erst im Bereich der Ther- mosphäre mit ausreichend großen freien Weglängen, wo auch genügend ionisierende UV-Strahlung vorhanden ist, nimmt die mittlere Lebensdauer der Ionen und freien Elektronen so stark zu, dass an ihnen Radiowellen reflektieren. Die **Ionenkonzentration** ist auch in der Ionosphäre gegen- über den neutralen Luftbestandteilen sehr gering. So kommt in 100 km Höhe auf 100 Millionen neutrale Teilchen nur ein Ionenpaar. In 300 km ist das Verhältnis 10.000:1 und in 1000 km nur noch 10:1. Erst dann kehrt sich das Verhältnis um, so dass die elektrisch geladenen Teilchen über- wiegen. Infolge der Erdrotation prägt der Tagesgang der UV-Strahlung auch die Ionenkonzentration. Außerdem hängen UV- und Korpuskular- strahlung von der Sonnenaktivität ab. Die Schwankungen der Ionenkon-

Ionosphäre

freie Weglänge

Ionenkonzentration



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Günter Schlungbaum

Biogeochemische Stoffkreisläufe

Universität Rostock

Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Ausgewählte ökologische Grundlagen für Betrachtungen zum Stoffhaushalt und zur Stoffdynamik	9
1.1 Zur Wiederverwendung der Stoffe im Lebensgeschehen	9
1.2 Ökologische Begriffe	9
1.3 Ökologische Wirkungsmechanismen	9
1.4 Bedeutung ökologischer Aspekte für die Stoffdynamik	11
1.5 Stoffliche Dynamik in Ökosystemen	11
1.5.1 Photosynthese/Energiefluss	11
1.5.2 Stoffhaushalt	12
1.5.3 Stoffkreisläufe	13
2 Stoffverteilung und Kreisläufe in der Geosphäre	15
2.1 Aufbau der Geosphäre	15
2.2 Stoffverteilung und Stoffwandlungen in der Atmosphäre	16
2.2.1 Aufbau der Atmosphäre und Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche	16
2.2.2 Stoffliche Zusammensetzung und Entwicklung der Atmosphäre ..	16
2.2.3 Entstehung der Erdatmosphäre	18
2.2.4 Heutige anthropogene Beeinflussung der Atmosphäre / Klimawirksame Spurengase	21
2.3 Stoffverteilung und Stoffveränderungen in der Lithosphäre	25
2.3.1 Aufbau der Lithosphäre	25
2.3.2 Geochemische und geophysikalische Prozesse („Kreislauf der Gesteine“)	25
2.3.3 Elementare Struktur der Lithosphäre	27
2.3.4 Sedimentation	28
2.3.5 Diagenese	29
2.4 Die Pedosphäre aus der Sicht der Stoffkreisläufe	29
2.4.1 Böden	29
2.4.2 Anorganische Bodensubstanz und Zusammenhänge zu den Stoffkreisläufen	32
2.4.3 Ionenaustauschvermögen von Böden	34

2.4.4	Nährstoffverfügbarkeit in Böden	38
2.5	Die Hydrosphäre/Der Wasserkreislauf – ein wichtiger Träger für die Stofftransporte	42
2.5.1	Verteilung des Wassers auf der Erde	43
2.5.2	Wasserkreislauf	44
2.5.2.1	Der Wasserkreislauf in humiden Gebieten	46
2.5.2.2	Der Wasserkreislauf in ariden Gebieten	46
2.5.3	Wasserdynamik in den Böden	47
2.5.4	Stoffliche Zusammensetzung verschiedener Wasserarten	48
2.5.4.1	Gelöste Stoffe in Meer- und Süßwasser	48
2.5.4.2	Gelöste Stoffe im Grundwasser	49
2.5.5	Stoffliche Zusammensetzung des Gebietsabflusses unter anthropogener Wirkung	50
3	Der Sauerstoffhaushalt	51
3.1	Sauerstoffbilanz auf der Erde	53
3.2	Gibt es anthropogene Störungen des Sauerstoffhaushaltes auf der Erde?	54
4	Kohlenstoffkreislauf	57
4.1	Kohlenstoff und Kohlenstoffverbindungen	57
4.2	Kohlenstoffkreislauf	58
4.3	Primärproduktion verschiedener Ökosysteme	61
4.4	Kohlenstoffkreislauf in ausgewählten Ökosystemen	62
4.4.1	Kohlenstoffkreislauf im Boden	62
4.4.2	Kohlenstoffkreislauf im Wasser	65
4.5	Kohlendioxid/Kohlensäure/Kalziumkarbonat-System	69
4.6	Kohlensäure/Kalk-System in der Wassernutzung	75
4.7	Rolle von Methan im Kohlenstoffkreislauf	77
4.8	Treibhauseffekt und CO ₂ -Kreislauf	79
5	Stickstoffkreislauf	81
5.1	Stickstoff und seine Verbindungen	81
5.2	Stickstoffkreislauf in der Biosphäre	84
5.2.1	Mikrobielle Prozesse	85
5.2.2	Ammonifikation	87

5.2.3	Nitrifikation	88
5.2.4	Nitrat-Reduktion und Denitrifikation	90
5.2.5	Stickstoff-Fixierung	92
5.3	Spezielle Aspekte in Böden	94
5.4	Spezielle Aspekte in den Gewässern	97
5.5	NH ₃ /NH ₄ ⁺ -Gleichgewicht in Gewässern	99
5.6	Wirkung von anthropogenen Eingriffen in den Stickstoffkreislauf	100
6	Phosphorkreislauf	107
6.1	Phosphor und sein Vorkommen	107
6.2	Phosphor und seine Verbindungen	111
6.2.1	Dissoziation der Phosphorsäure	112
6.2.2	Polyphosphate	113
6.2.3	Phosphorverbindungen und Phosphorfraktionen in der Wasserphase der Gewässer	116
6.3	Mikroorganismen im Phosphorkreislauf	117
6.4	Phosphatkreislauf in Gewässern	118
6.4.1	Kopplung von P- und Fe-Kreislauf	120
6.4.2	Phosphatsorptions-/Phosphatdesorptionsgleichgewichte	121
6.4.3	Phosphatbindungsformen in Sedimenten	125
6.4.4	Sedimente im Phosphorkreislauf	127
7	Schwefelkreislauf	129
7.1	Schwefel und Schwefelverbindungen in der Natur	129
7.2	Grundlagen für den Schwefelkreislauf	130
7.2.1	Reaktionen des organischen Schwefels	134
7.2.2	Reaktionen des Schwefelwasserstoffes	134
7.2.3	Reduktion von Sulfat	135
7.3	Schwefelkreislauf im Boden	136
7.4	Schwefelkreislauf in Oberflächengewässern	136
7.5	Antropogene Überprägungen des Schwefelkreislaufes	139
8	Siliziumkreislauf	143
8.1	Vorkommen von Silizium in der Natur	143
8.2	Siliziumkreislauf	144

9	Kalziumkreislauf	145
9.1	Kalziumvorkommen und -verteilung	145
9.2	Biologische Bedeutung von Kalzium	146
9.3	Kalziumkreislauf	146
10	Kaliumkreislauf	149
10.1	Kaliumdynamik im Boden	150
10.2	Kaliumdynamik in den Gewässern	150
11	Kreislauf der Schwermetalle	151
11.1	Schwermetalle in Natur und Umwelt	151
11.2	Metalle/Spurenmetalle aus biogeochemischer Sicht	152
11.2.1	Spurenmetalle aus geologischer Sicht	152
11.2.2	Spurenmetalle aus biologischer Sicht	153
11.3	Akkumulation von Metallen/Spurenmetallen in der Biosphäre	154
11.4	Erscheinungsformen von Metallen in der Umwelt	155
11.5	Reaktivität der Schwermetalle im Stoffkreislauf in Gewässern	156
11.6	Biologische Verfügbarkeit von Schwermetallspezies	157
11.7	Konzentrationen und Toxizität von Schwermetallen in Gewässern	158
11.8	Eisenkreislauf	160
11.9	Mangankreislauf	161
12	Netzwerk der biogeochemischen Stoffkreisläufe	163
12.1	Redoxpotential für die Vernetzung der Stoffkreisläufe	164
12.2	Der biogeochemische Stoffabbau unter aeroben/anaeroben Bed.	170
13	Anhang	173
13.1	Literaturhinweise	173
13.2	Glossar	176
13.3	Kontrollfragen	180
13.4	Abbildungsverzeichnis	
13.5	Tabellenverzeichnis	

Vorwort

Das vorliegende Lehrmaterial wurde – wie das zur „Allgemeinen Gewässerkunde“ – auf der Grundlage von Vorlesungen zur Angewandten Ökologie und Gewässerkunde für Studenten verschiedener Fakultäten

- Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Fachrichtung Biologie in der Spezialisierung Ökologie
- Agrarwissenschaftliche Fakultät, Fachrichtung Landeskultur und Umweltschutz
- Ingenieurwissenschaftliche Fakultät, Richtung Umwelttechnik

erarbeitet. Die für dieses Lehrmaterial herangezogene Spezialliteratur ist im Literaturverzeichnis gekennzeichnet.

Der Autor hat von 1953 bis 1959 an der Universität Rostock Chemie studiert. Die Promotion erfolgte extern mit einem Thema zur Torfanalytik. Die Habilitation wurde 1980 mit einer Arbeit zur Stellung der Sedimente im Stoffkreislauf von Küstengewässern abgeschlossen. Er vertrat in der Lehre die Fächer Wasser- und Sedimentchemie sowie die Angewandte Ökologie mit den Spezialisierungen biogeochemische Stoffkreisläufe und Gewässerschutz. Forschungsschwerpunkte waren die Nährstoffkreisläufe, die Sediment/Wasser-Wechselwirkungen, die Gewässerbewertung und der Gewässerschutz für Seen, Flüsse und Küstengewässer.

Günter Schlungbaum

1 Ausgewählte ökologische Grundlagen für Betrachtungen zum Stoffhaushalt und zur Stoffdynamik

1.1 Zur Wiederverwendung der Stoffe im Lebensgeschehen

Bereits der römische Dichter und Philosoph Lucretius (Lucretius, Buch 1; Vers 262 -265) hat vor 2000 Jahren in seinem Werk „Von der Natur der Dinge“ („De rerum natura“) eine Meinung zur Wiederverwendung von Stoffen in der Natur (=Stoffkreisläufe) vertreten:

*De rerum natura
(Lucretius)*

*haud igitur penitus pereunt quaecumque videntur, quando
alid ex alio reficit natura nec ullam rem gigni patitur, nisi
morte adiuta aliena.*

*(„Daher geht nichts ganz zugrunde, auch wenn es dem
Blick so erscheint, weil die Natur alle Stoffe von neuem
verwendet und immer Neues erschaffen erst kann, nachdem
Altes im Tode zerfallen.“)*

1.2 Ökologische Begriffe

Ökologie ist die Lehre von der Gesamtheit der Beziehungen zwischen Lebewesen bzw. den Lebensgemeinschaften (Biozönosen) und ihrer Umwelt (Biotop). Zur Erfassung und Erforschung dieser Wechselbeziehungen werden je nach Fragestellung unterschiedlich große Systeme abgegrenzt, in denen belebte (biotische) und unbelebte (abiotische) Komponenten miteinander verknüpft sind (Ökosysteme).

*Ökologie
Biozönose
Biotop
Ökosysteme*

Die Verknüpfungen führen dazu, dass Ökosysteme über eine mehr oder minder große Fähigkeit zur Selbstregulation verfügen, d.h. Störungen werden bis zu einem gewissen Grade ohne Veränderung des Systems ausgeglichen (Puffervermögen), z.B. Selbstreinigungsvermögen der Gewässer.

*Selbstregulation
Puffervermögen*

1.3 Ökologische Wirkungsmechanismen

Eine der wesentlichsten Erkenntnisse der Ökologie ist, dass alles voneinander abhängig ist. So beeinflussen sich z.B. Umweltfaktoren (=Standortfaktoren) eines Ökosystems gegenseitig.

Vernetzung

Bei einem Fließgewässer können z.B. die Fließgeschwindigkeit, die Art der Sedimente und die Wasserqualität, das Klima, die Licht- und Temperaturverhältnisse, das Ausgangsgestein des Flussbettes die Wasserqualität und damit u.a. wieder die Lichtverhältnisse beeinflussen. Dabei bestimmt die Gesamtheit dieser Umweltfaktoren das Biotop und damit die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft.

Die Nährstoffe werden entweder in demselben System (geschlossenes System mit Nährstoffkreislauf) oder im benachbarten System (offenes System mit Nährstoffdurchlauf) wieder zum Aufbau neuer organischer Substanzen verwendet. Grundsätzlich sind Ökosysteme aus thermodynamischer Sicht offene Systeme. Hier werden die Begriffe offen und geschlossen aus der Sicht der Stoffbilanz gebraucht.

Die Glieder der Lebensgemeinschaft sind vor allem über die Nahrungskette miteinander verbunden. Ausgangspunkt der Kette sind die Produzenten (autotrophe Organismen wie Algen, Moose, Farne, höhere Pflanzen sowie einige Bakterienarten), die aus anorganischen Stoffen organische Substanzen aufbauen. Von diesen abhängig sind die Konsumenten erster Stufe (pflanzenfressende Tiere), von denen wiederum die Konsumenten zweiter Stufe (fleischfressende Tiere). Von der organischen Substanz sowohl der Produzenten wie der Konsumenten leben schließlich die Destruenten (Bakterien und Pilze). Da bei Produzenten, Konsumenten und Destruenten viele Arten beteiligt sind, die in der Regel unterschiedliche Kombinationen in der Nahrungsabhängigkeit zulassen, spricht man von einem Nahrungsnetz. Somit wird verständlich, dass die Entnahme von Produzenten durch Entkrautung zu wesentlichen Veränderungen einzelner Lebensgemeinschaften führen kann.

Es beeinflussen sich nicht nur die Umweltfaktoren eines Biotops und die Lebewesen einer Biozönose gegenseitig, sondern die Biozönose wird einerseits vom Biotop bestimmt, andererseits kann auch die Biozönose den Biotop verändern. So führt z.B. der Pflanzenwuchs (die Verkrautung) im Fließgewässer zur Verringerung der Fließgeschwindigkeit, zu verstärkter Sedimentation und zur Erhöhung des Wasserstandes.

Die Nährstoffe werden entweder in demselben System oder im benachbarten System wieder zum Aufbau neuer organischer Substanzen verwendet.

1.4 Bedeutung ökologischer Aspekte für die Stoffdynamik

Bei vielen Nutzungen werden Biotop und Biozönose im wesentlichen über den Stoffhaushalt verändert, wenn dem Ökosystem zusätzlich Stoffe, meist Nährstoffe, zugeführt oder entzogen werden.

Die einzelnen Ökosysteme sind vernetzt, d.h. voneinander abhängig. Die Schädigung eines Systems, die sich in Qualität und Quantität der Stoffumsätze oder in der Artenveränderung/Artenverarmung widerspiegelt, zieht zwangsläufig die Beeinträchtigung anderer Systeme nach sich. Der Mensch ist nach wie vor von seiner belebten Umwelt als Produktions- und Erlebnisraum abhängig. Deshalb ist für den Menschen die Erhaltung seiner natürlichen Umwelt – dazu gehören alle Teile der Biosphäre – neben ethischen, ästhetischen und wissenschaftlichen Aspekten eine wesentliche Daseinsvorsorge.

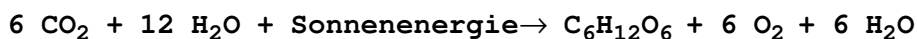
1.5 Stoffliche Dynamik in Ökosystemen

1.5.1 Photosynthese/Energiefluss

Die wichtigste Funktion eines Ökosystems besteht in der Fixierung von Sonnenenergie, die zur Bildung pflanzlicher Biomasse führt. So werden durch die Photosynthese (=Assimilation von Kohlenstoff) von 1,5 g CO₂ ca. 1g Trockensubstanz gebildet. Der daran anschließende, an Organismen gebundene Energiefluss läuft durch das Ökosystem, untrennbar gekoppelt an einen Stoff- und Informationsfluss. Von den Primärproduzenten – die grünen Landpflanzen oder das Phytoplankton der Gewässer – wird tatsächlich/effektiv zwischen 0,1 und 1,4% der Sonnenenergie mittels der Photosynthese in Form von chemischer Energie in Kohlenhydraten festgelegt.

Photosynthese

Primärproduktion



Nach der Photosynthesegleichung werden an Energie 2880 kJ (mol Glucose) bzw. 480 kJ (mol C) gespeichert. Durch Atmung und Gärung werden die Kohlenhydrate wieder gespalten, und die hierdurch freigesetzte Energie kann im System weiterhin genutzt werden.

Etwa die Hälfte der in Phytomasse gebundenen Energie (Bruttoprimärproduktion) wird im Zuge der Atmung sofort wieder für den Eigenbedarf verbraucht, so z.B. für Wasser- und Nährstoffaufnahme, Stoffumwandlungen, Wachstum, Transpiration. Hierbei treten erhebli-

che Wärmeverluste auf. Messbar und für Konsumenten nutzbar ist daher nur die Nettoproduktion.

biogeochemische,
biohydrochemische
Kreisläufe

Die Sonne ist der Motor für alle biogeochemischen und biohydrochemischen Kreisläufe.

Mit der Abb. 1 wird ein vereinfachtes Energieflussdiagramm mit einem biogeochemischen Stoffkreislauf in Verzahnung dargestellt.

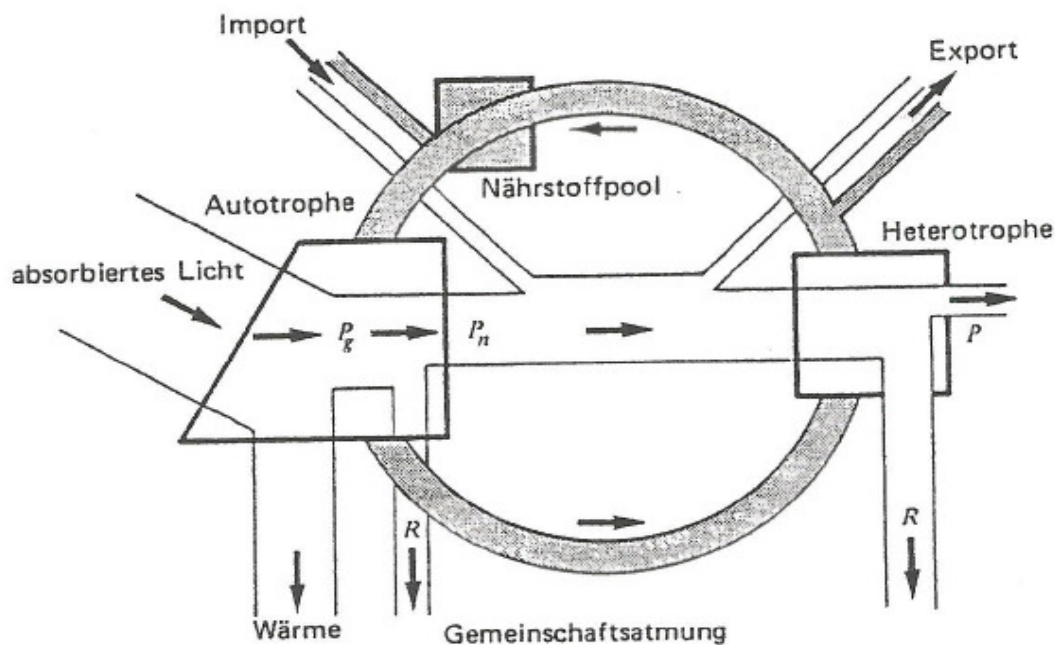


Abb. 1: Ein biogeochemischer Stoffkreislauf (gerastert) auf einem vereinfachten Energieflussdiagramm, um den Gegensatz zwischen Stoffkreislauf und Energiefluss zu zeigen. P_g = Bruttoproduktion P_n = Nettoproduktion (kann im System von Heterotrophen verbraucht oder exportiert werden) P = Sekundärproduktion R = Atmung nach E.P. ODUM, 1963/aus ODUM, 1980

Die Abbildung zeigt auch, wie der Energiefluss den Stoffkreislauf in Gang hält. Jeder Stoffkreislauf braucht ein Reservoir aus dem er schöpfen kann. In Abb. 1 ist diese Reserve als Nährstoffpool eingezeichnet.

1.5.2 Stoffhaushalt

Stoffhaushalt

Die wichtigsten Aspekte des Stoffhaushaltes sollen am Beispiel eines Gewässers dargestellt werden.

Der Stoffhaushalt ist die Summe des Stoff- und Energieumsatzes in einem Ökosystem. Die Untersuchung des Stoffhaushaltes eines Gewässers geht von der Feststellung der gelösten Inhaltsstoffe und ihrer

Verteilung nach Raum und Zeit aus. Damit allein ist jedoch noch kein Einblick in den Stoffhaushalt gewonnen, denn die eigentlichen Akteure im Stoffhaushalt aller Gewässer (aller Ökosysteme) sind die Organismen, die Stoffe aufnehmen, zur Speicherung oder Gewinnung von Energie umwandeln, ausscheiden und anderen Organismen weitergeben und die schließlich selbst dem chemischen und mikrobiellen Abbau unterliegen. In Fließgewässern ist dieser biogene Stoffhaushalt, verglichen mit der Fracht an transportiertem Material, verschwindend gering. Sind Fließgewässer die Drainagesysteme der Landschaft, so sind Seen Speicherbecken in der Landschaft.

Grundlagen des Stoffhaushaltes der Gewässer sind demnach:

- das Wasser als Lösungsmittel,
- die gelösten und partikulären Stoffe im Wasser,
- die Organismen im Gewässer.

Darauf aufbauend ist der Stoffhaushalt der Gewässer gekennzeichnet durch die folgenden allgemeinen Vorgänge:

- Die Bioaktivität der Organismen, die z.B. in Produktion, Konsumption und Destruktion zum Ausdruck kommt (Stoffkreisläufe, Energiefluss),
- der chemische und besonders organismische Transport von Stoff- und Energiemengen in das Sediment und Abgabe aus dem Sediment in das Wasser,
- der Rhythmus von Zirkulation und Stagnation im See und der einseitige Stoff- und Energieabfluss in Fließgewässern sowie
- der Austausch von Stoffen mit der Atmosphäre durch Stofftransporte über Niederschläge, durch Stofftransporte über Zufluss und Abfluss sowie durch stoffliche Wechselwirkungen über Sorption und Desorption.

1.5.3 Stoffkreisläufe

In der Biosphäre befinden sich viele Elemente in charakteristischer Weise in einem Kreislauf zwischen Umwelt und Organismen.

Allgemein werden die Kreisläufe in der Natur als **biogeochemische Stoffkreisläufe** zusammengefasst. *biogeochemisch*

- „**Bio**“ bezieht sich hierbei auf die lebenden Organismen,

- „Geo“ auf die unbelebten Teile der Natur (Steine, Luft und das reine Wasser) der Erdrinde.

Geochemie

Die Geochemie ist eine naturwissenschaftliche Disziplin und befasst sich mit der chemischen Zusammensetzung der Erde und mit dem Austausch von Elementen/Stoffen zwischen verschiedenen Teilen der Erdrinde und ihren Meeren, Flüssen und anderen Wasserkörpern.

*Nährstoffkreisläufe
essentielle Elemente*

Mit dem Begriff „Nährstoffkreisläufe“ wird speziell der Umlauf der unmittelbar lebenswichtigen Elemente und anorganischen Verbindungen bezeichnet. Von den ca. 90 bekannten Elementen sind zwischen 30 und 40 für die lebenden Organismen von Bedeutung (= essentielle Elemente).

Zu jedem Kreislauf gehören zwei Kompartimente („Pools“):

- ein großer, langsam ablaufender, im Allgemeinen nicht-biologischer Teil, der mit dem Reservoir der Elemente im Ökosystem verbunden ist und
- ein kleinerer, aber aktiverer Teil der Kreisläufe mit sehr schnellem Austausch zwischen Organismen und ihrer unmittelbaren Umwelt.

Biosphäre

In der Biosphäre werden zwei Grundtypen von biogeochemischen Stoffkreisläufen unterschieden:

Gaskreisläufe

- Gaskreisläufe: Kreislauf mit der Atmosphäre oder Hydrosphäre (insbesondere dem Meer) als Reservoir.

Sedimentkreisläufe

- Sedimentkreisläufe: Hier dient die Erdkruste mit ihren Bestandteilen als Reservoir.

Diese Unterteilung besitzt naturgemäß keine scharfen Trennlinien, so tritt z.B. CO₂ auch als Carbonat in den Sedimentzyklus ein.

Mit diesem Lehrmaterial soll versucht werden, wesentliche Stoffkreisläufe darzustellen und sie hinsichtlich ihrer Bedeutung für die gesamte Biosphäre zu bewerten. Dabei wird Wert darauf gelegt, die Zusammenhänge in natürlichen/naturnahen Systemen mit den von Menschen überprägten zu vergleichen.



STRUKTUR UND FUNKTION VON ÖKOSYSTEMEN

HENDRIK SCHUBERT

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Einführung und Begriffsbestimmung	9
1.1 Grundbegriffe der Ökologie	9
1.2 Die Organismen	12
1.2.1 Das Fünf-Reiche-Konzept	13
1.3 Kurzer Abriss der Geschichte der Ökologie	16
1.4 Umweltansprüche und Umweltparameter	18
1.4.1 Wirkung von Umweltfaktoren	18
1.4.2 Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre	26
1.5 Zusammenfassung	30
2 Ökologie und Evolution	35
2.1 Entstehung und generelle Entwicklung des Lebens	35
2.2 Genmanipulation als „künstliche Evolution“	38
2.3 Ökologische Triebkräfte der Evolution	39
2.4 Umweltfaktoren und Nischen	44
3 Autökologie	51
3.1 Strahlungsenergetische Faktoren	51
3.1.1 Allgemeines zu Strahlung und Licht	51
3.1.2 Die Strahlung auf der Erde	54
3.1.3 Licht und Pflanzen	57
3.1.3.1 Lichteinfall und Bestand	57
3.1.3.2 Reaktionen der Pflanzen auf das Licht	59
3.1.4 Licht und Tiere	72
3.1.5 Temperatur	80
3.1.5.1 Allgemeines zu Wärme und Temperatur	80
3.1.5.2 Wärme bzw. Hitze und Pflanzen	84
3.1.5.3 Kälte bzw. Frost und Pflanzen	89
3.1.5.4 Temperatur und Tiere	97
3.2 Wasser	99
3.2.1 Wasser - wofür?	99
3.2.2 Wasser - woher? Das Planetarische Windsystem (PWS)	100

3.2.3	Lokale Störungen des PWS	104
3.2.4	Klima & Lebewelt	106
3.2.4.1	Großklimata	106
3.2.4.2	Biome	107
3.2.4.3	Bodenwasser	110
3.2.4.4	Wasseraufnahme bei Pflanzen	113
3.2.4.5	Wasserabgabe bei Pflanzen	116
3.2.4.6	Organisationsformen des Wasserhaushalts bei Pflanzen	118
3.2.4.7	Wasserhaushalt bei Tieren	123
3.2.4.8	Wasserabgabe und Wasserverluste bei Tieren	124
3.3	Salzgehalt und osmotischer Druck	125
3.3.1	Ionenregulation und Osmoregulation	125
3.3.2	Entwicklungsgeschichte der Osmoregulationstypen	129
3.3.3	Konsequenzen der Anpassungsstrategien	133
3.3.4	Interaktion zwischen Osmo- und Ionenregulation	136
3.4	Biotische Interaktionen	140
3.4.1	Einführung und Übersicht	140
3.4.2	Neutralismus	142
3.4.3	Konkurrenz	142
3.4.4	Amensalismus	143
3.4.5	Parasitismus / Prädation	144
3.4.6	Antibiose	146
3.4.7	Kommensalismus	147
3.4.8	Protokooperation	148
3.4.9	Mutualismus	149
4	Populationsökologie	151
4.1	Begriffsbestimmungen	151
4.2	Populationsgenetik	152
4.3	Eroberung von Habitaten	158
4.4	Demographie	160
4.4.1	Altersstruktur	160
4.4.2	Populationswachstum	161
4.4.3	Verteilung der Organismen im Raum	163
4.5	Regulation der mittleren Populationsdichte	167
4.5.1	Möglichkeiten der Regulation	167

4.5.2	Selbstregulation	168
4.5.3	Limitationseffekte	174
4.5.4	Einfluss von Prädatoren	180
4.5.5	Konkurrenzeffekte	185
5	Synökologie	187
5.1	Analyse von Ökosystemen	187
5.1.1	Grundzüge der ökologischen Methodik	187
5.1.2	Modellierung	188
5.2	Ökosystemstruktur	189
5.2.1	Einführung	189
5.2.2	Struktur und Organisation der Biozönose	192
5.2.2.1	Artenzusammensetzung, Mannigfaltigkeit und Verteilung	192
5.2.2.2	Klassifikation	193
5.3	Ökosystemfunktion	194
5.3.1	Energiefluss	194
5.3.1.1	Thermodynamik geschlossener und offener Systeme	194
5.3.1.2	Grundstruktur des Energieflusses	195
5.4	Nahrungsnetze und Stoffkreisläufe	196
5.4.1	Nahrungsketten und Nahrungsnetze	196
5.4.2	Stoffkreisläufe	198
5.4.3	Produktion	200
5.5	Ökosystementwicklung	201
5.5.1	Grundlagen	201
5.5.2	Regulation, Periodizität und Sukzession	202
5.5.3	Klimax-Theorie und Mosaik-Zyklus-Hypothese	205
5.5.4	Inselbiogeografie und Lebensraumgröße als Umweltqualität	207
5.5.5	Konstanz und Stabilität	209
5.6	Ökosysteme	211
5.6.1	Übersicht	211
5.6.2	Aquatische Ökosysteme	212
5.6.2.1	Meer	212
5.6.2.2	Ästuare	213
5.6.2.3	Süßwasserökosysteme	214
5.6.3	Terrestrische Ökosysteme	217
5.6.3.1	Grundlagen	217

5.6.3.2	Waldbiome	217
5.6.3.3	Grasländer	219
5.6.3.4	Wüsten	220
5.6.3.5	Tundren	221
5.6.4	Anthropogen geprägte Ökosysteme	222
5.6.4.1	Agrarökosysteme	222
Sämtliche Kontrollfragen im Überblick		227
Literaturverzeichnis		235
Abbildungsverzeichnis		137
Stichwortverzeichnis		141

Vorwort

An dieser Stelle soll einmal nicht über die Rolle und Bedeutung des Wissenschaftsgebietes der Ökologie geschrieben werden – die allgegenwärtige Diskussion über Energiepolitik, Klimawandel und Globalisierung hat dazu geführt, dass jeder Leser dieses Materials sich mit den „angewandten Aspekten“ der Ökologie zwangsläufig ausreichend beschäftigt hat.

Stattdessen sollen einige Hinweise zum Umgang mit dem Material gegeben werden:

1. Bitte lesen Sie das Material rechtzeitig vor der Präsenzveranstaltung – nur so haben Sie Gelegenheit, diese für Fragestellungen zu nutzen.
2. Lesen Sie das Material stückweise. Es ist „hochkomprimiert“ und mehr als 5 - 6 Seiten auf einen Schlag sind wahrscheinlich schwer verdaulich – man hat sie dann zwar gelesen, aber nicht verarbeitet bzw. verstanden. Bitte bedenken Sie, dass selbst Vollzeitstudenten, die sich ganz auf 3 - 4 Fächer je Semester konzentrieren können für diesen Klops ein halbes Jahr benötigen. Selbst die Ihnen vorliegende abgerüstete Variante ist also nicht in den letzten 2 Wochen vor der Prüfung zu bewältigen!
3. Bleiben Sie kritisch – an vielen Stellen musste, oft mit Bauchschmerzen, vereinfacht werden. Je nach Hintergrund des Lesers ergibt sich aus jeder Vereinfachung die Gefahr eines Missverständnisses. Kommt Ihnen etwas „spanisch“ vor, dann haken Sie nach (z. B. auf der Präsenzveranstaltung).
4. Bleiben Sie neugierig – es ist schwer einzuschätzen, wo die berühmten „qualifizierte Mehrheit“ des gemeinsamen Wissenshintergrundes liegt. Unser föderales Bildungssystem hat leider den Nachteil, dass schon die Rahmenlehrpläne der Länder derart differieren, dass es keinen gemeinsamen Grundkanon naturwissenschaftlicher Kenntnisse gibt, auf den man vertrauen könnte. Wenn Sie beim Lesen also auf Unbekanntes stoßen, das Ihnen nicht ausreichend tiefgründig erläutert wird dann haken Sie nach – ein Stichwort im Internet eingeben liefert Ihnen heutzutage mehr Informationen, als Sie haben wollen und jede derartige Extratour bereichert Ihr Wissen.
5. Entwickeln Sie Konzepte – die reine Anhäufung von Wissen durch lernen liefert nur die Basis für Bildung. Ob Sie diese Basis ausreichend aufgebaut haben, können Sie mit Hilfe der Kontrollfragen am Ende der Kapitel leicht selbst überprüfen. Um dieses Wissen aber in der Praxis anwenden zu können müssen Sie in der

Lage sein, es den jeweiligen Bedingungen anpassen zu können. Dazu ist Verständnis notwendig und das wird nicht durch Auswendiglernen erworben. Die zahlreichen Fallbeispiele und Illustrationen dieses Materials wird niemand abfragen – sie dienen dazu, Ihnen exemplarisch zu verdeutlichen wie „Schubkastenwissen“ im konkreten Fall auf Relevanz überprüft und entsprechend angepasst werden muss.

6. Beachten Sie Grenzen - jede „Wahrheit“ hat ihre Grenzen, innerhalb derer sie gültig ist. Extrapoliert man, läuft man schnell Gefahr dieses „Wahrheitsfenster“ zu verlassen. Die im Material angeführten Gesetzmäßigkeiten sind daher stets im Kontext ihrer Entstehungsgeschichte zu betrachten und es hilft Überinterpretationen zu umgehen, wenn man weiß, auf welcher experimentellen oder empirischen Basis sie entwickelt wurden.

Ein letzter Punkt muss noch zum Material selbst gesagt werden. Zunächst ist anzumerken, dass es sich um ein reines Lehrmaterial für Ihren persönlichen Gebrauch handelt. Es eignet sich nicht als Quellenangabe, da die zugrundeliegenden Fakten weitgehend nicht Originalquellen sind – Letztere sind daher stets zu konsultieren und dann auch zu zitieren, wenn die angeführten Fakten über den reinen Gebrauch als Lerngrundlage hinaus verwendet werden sollen.

Weiterhin wird Ihnen auffallen, dass Kapitel 5 über weite Strecken stilistisch von den restlichen Kapiteln abweicht. Kapitel 5 ist, im Gegensatz zu Kapitel 1 - 4, die völlig neu entstanden sind, lediglich überarbeitet und ergänzt worden. Die Grundlage für Kapitel 5 wurde von Prof. U. Schiewer gelegt, der einen weitaus prägnanteren Satzbau als ich beherrschte und die Vorlagen, die Dr. Schumann und ich ihm seinerzeit lieferte nicht nur inhaltlich, sondern auch stilistisch wesentlich verbesserte. Aber auch an den neu entstandenen Kapiteln haben neben dem Autor zwei Personen mitgewirkt ohne deren Beteiligung die Länge der Schachtelsätze des Autors unerträglich geblieben wäre: Manfred Schubert und Gesche Kohlberg. Ihnen sei für ihren Beitrag bei der sprachlichen Überarbeitung der Manuskripte an dieser Stelle ausdrücklich gedankt. Mehr noch, zahlreiche inhaltliche Ergänzungen wurden von beiden vorgenommen und so sind nicht nur Winnie the Poo in dieses Buch gelangt, sondern auch der Weinbau in Mecklenburg und die Blattlaus-Bakterien Symbiose; alles Dinge, die ich bis dahin gar nicht kannte.

In der Hoffnung, dass Ihnen das Material nicht nur Wissen vermittelt, sondern auch interessant zu lesen erscheint, wünsche ich Ihnen für ihr Studienvorhaben viel Erfolg und ende mit der Bitte, Ihnen aufgefallene inhaltliche und sonstige Ungereimtheiten mir mitzuteilen, so dass das Material mit den Jahren reifen kann.

Hendrik Schubert

1 Einführung und Begriffsbestimmung

1.1 Grundbegriffe der Ökologie

Der Begriff „Ökologie“ wurde 1866 erstmals durch HAECKEL in die Biologie eingeführt.

Eine heute weit verbreitete Definition des Begriffes wurde von KREBS (1985) eingeführt:

Ökologie ist die Wissenschaft, die sich mit den Wechselbeziehungen befasst, die die Verbreitung und das Vorkommen der Organismen bestimmen.

Das Problem ist jedoch, dass sich die Gesamtheit der Wechselwirkungen zwischen allem und jedem nicht mehr erfassen lässt. Darum wird es notwendig, das Allumfassende für die problemorientierten Betrachtungen auf das jeweils unmittelbar Interessierende zu beschränken. Will man also im Sinne der Definition von Krebs das Vorkommen eines Organismus oder einer Gemeinschaft von Organismen untersuchen, muss man die Ebene der Betrachtung der „Gesamtumwelt“ (globaler Haushalt) verlassen und sich auf die wirksame Umwelt beschränken (siehe Abb. 1.1).

Ein **Biotop** ist dabei der Lebensraum oder Standort („Habitat“) von Organismen mit seinen Bedingungen, die für die Existenz und das Gedeihen der Organismen verantwortlich sind.

Wird nicht der Einzelorganismus sondern eine Lebensgemeinschaft betrachtet, so bezeichnet man das Zusammenleben von mehreren Tierarten oder mehreren Pflanzenarten bzw. von Tier- und Pflanzenarten zusammen als **Biozönose**.

Dabei verfügt jede Art oder Rasse über eine bestimmte **ökologische Amplitude** unter der das Intensitätsspektrum eines Umweltfaktors zu verstehen ist, innerhalb dessen das Vorkommen möglich ist. Kehrt man diese Betrachtungsweise um und betrachtet das Intensitätsspektrum eines Umweltfaktors an einem bestimmten Standort, so ergibt sich die **ökologische Valenz**.

Die ökologische Valenz ist also das Intensitätsspektrum eines bestimmten Faktors an einem Standort, wohingegen die ökologische Amplitude den Intensitätsbereich des Faktors angibt, den ein Organismus ertragen kann.

In unseren Breiten wäre die Valenz hinsichtlich der Temperatur der Bereich zwischen ca. $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und ein Organismus, der hier ganzjährig vorkommt, müsste diesen Temperaturbereich in seine ökologische Amplitude einschließen. Tut er das nicht, muss er entweder Überdauerungsformen entsprechender Temperaturresistenz aufweisen oder immer wieder von Neuem in das Gebiet einwandern können, sobald die Bedingungen im Gebiet seiner ökologischen Amplitude entsprechen.

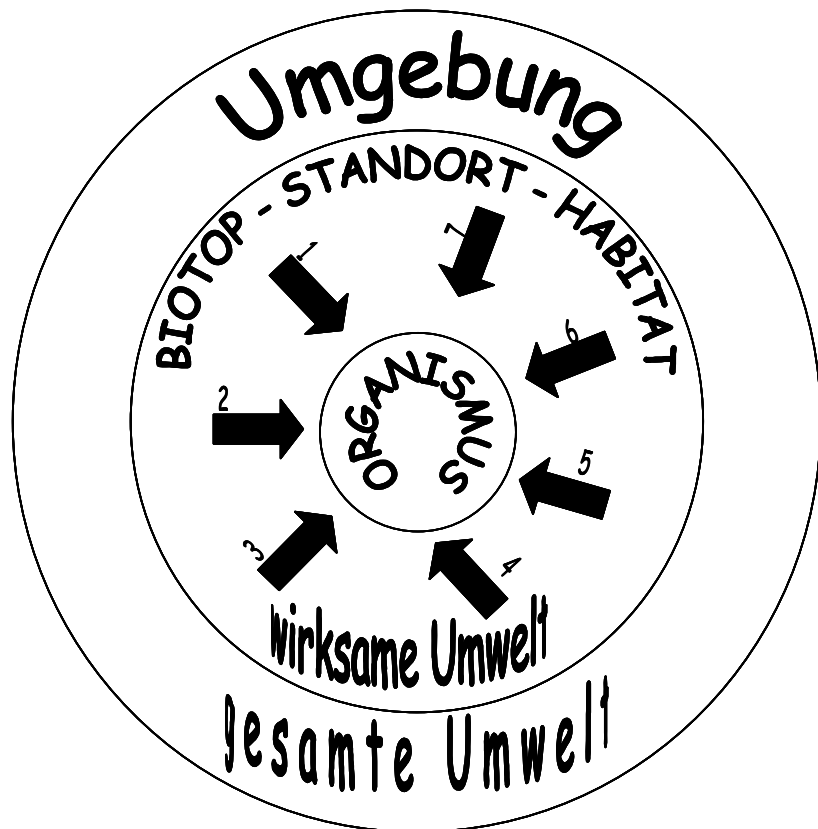


Abb. 1.1: Gesamte und wirksame Umwelt eines Organismus. Der äußere Kreis symbolisiert die gesamte Umwelt des Organismus, lediglich ein Teil (innerer Kreis) beeinflusst ihn jedoch. Zu dieser wirksamen Umwelt zählen: 1 - geophysikalische Umwelt, 2 - hydrische Umwelt, 3 - edaphische Umwelt, 4 - biotische Umwelt, 5 - technische Umwelt, 6 - kosmische Umwelt, 7 - physiographische Umwelt; *Quelle: SCHUBERT, 1991*

Für den Begriff „Umwelt“ gilt folgende Definition:

Die **Umwelt** ist die Gesamtheit der materiellen (stofflichen) und energetischen Einflussnahmen auf den jeweils betrachteten Gegenstand der Untersuchungen.

Als **Umweltfaktoren** werden die Einwirkungen der Umgebung auf ein Lebewesen bezeichnet. Sie umfassen die wirksamen Kräfte der Umwelt.

Somit ist die **wirksame Umwelt** der Teil der gesamten Umwelt, der einen direkten Einfluss auf das Leben eines Organismus bzw. einer Lebensgemeinschaft in einem bestimmten System (und unter Voraussetzung eines bestimmten Zeithorizontes der Betrachtung) ausübt.

Sollen Zusammenhänge betrachtet werden, dann ist der Begriff „**Ökosystem**“ einzuführen:

Das Ökosystem ist ein offenes Gefüge von Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und unbelebter Umwelt mit begrenzter Selbstregulierung. Ein Ökosystem umfasst also die Lebensgemeinschaften (Biozönose) in ihrer abiotischen Umwelt (Biotop). Das Ökosystem zeichnet sich durch eine weitgehende Geschlossenheit der Stoffkreisläufe bzw. eine Vollständigkeit der Energieflüsse aus. Als Grundelemente („Minimalausstattung“) eines Ökosystems werden dabei Primärproduzenten, Destruenten, ein Nährstoffpool und eine Energiequelle benötigt.

Als Beispiel für ein Ökosystem sei z. B. ein Süßwassersee genannt. Die Abb. 1.2 zeigt ein Energieflussdiagramm für ein Süßwasserökosystem:

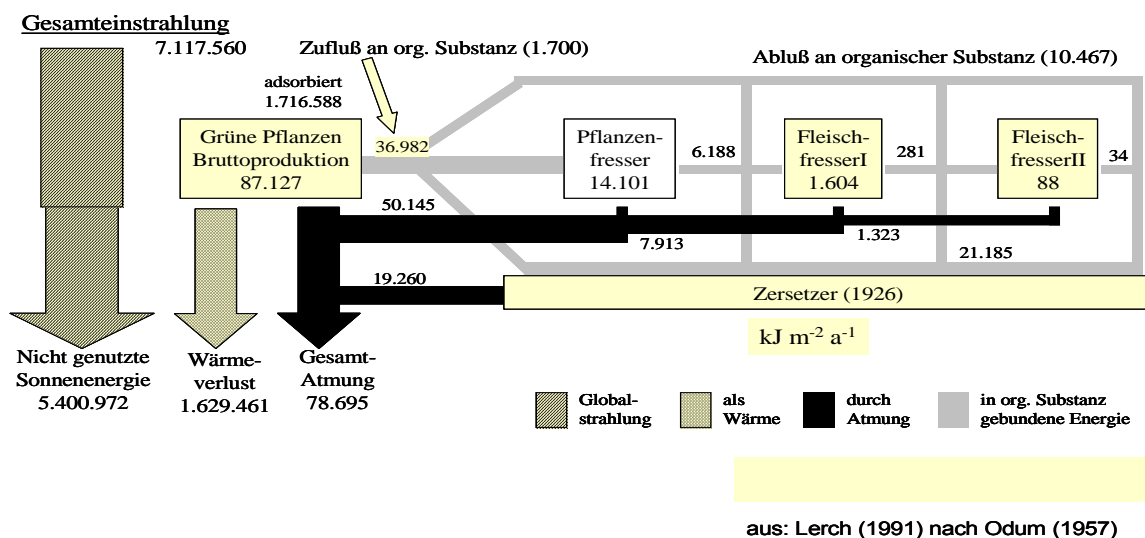


Abb. 1.2: Energiefluss in einem Süßwasserökosystem;
Quelle: LERCH (1991) nach ODUM (1957)

Das Schema des Energieflusses in Abb. 1.2 zeigt eines der wenigen Beispiele, in denen eine Totalanalyse eines zugegebenermaßen gut abgegrenzten Ökosystems möglich war. In den meisten anderen Ökosystemen sind solche Betrachtungen nicht oder, da auf von Hochrechnun-

gen und Extrapolationen beruhend, nur mit hohen Unsicherheitsfaktoren durchführbar. Stets aber ist, wie auch am vorliegenden Beispiel gut erkennbar, die exponierte Stellung von Pflanzen¹ und pflanzlichen Prozessen als Grundlage der Umsatzprozesse zu sehen. Diese besondere Rolle der Pflanzen wird häufig zur Rechtfertigung der „Pflanzenökologie“ als gesondertes Teilgebiet der Ökologie im Sinne der Definition nach KREBS (1985) herangezogen.

Um ein Schließen der Stoffkreisläufe zu ermöglichen, werden neben den Pflanzen als Primärproduzenten weitere Organismengruppen benötigt. Die Positionen der Pflanzenfresser (Phytophaga) und Fleischfresser (Carnivora) werden dabei durch Tiere, die Position der Zersetzer (Destruenten) durch Tiere, Pilze und Mikroorganismen besetzt.

1.2 Die Organismen

Bisher wurde relativ vage der Begriff „Pflanze“ im ökologischen Sinne eingeführt. „Mikroorganismen“, „Pilze“ und „Tiere“ wurden noch gar nicht definiert. Eine klare Definition dieser Gruppen ist nicht leicht zu formulieren. Keine Probleme bereitet es, in der Evolution „hoch“ stehende Organismen in ein Schema zu fassen. Sonnenblumen sind, da Photosynthese betreibend und mit Wurzeln ortsfest verankert ganz klar den Pflanzen zuzuordnen. Rehe können, da ortsbeweglich und feste Nahrung aufnehmend und verdauend, eindeutig den Tieren zugeordnet werden. Je einfacher jedoch die Organisationsstufe des betreffenden Lebewesens ist, desto komplizierter wird es.

Wo z. B. sollen Kryptoflagellaten eingeordnet werden die sowohl (mit Chloroplasten) wie autotrophe Pflanzen leben, aber auch partikuläre Nahrung fressen und sich, ebenfalls wie Tiere, frei bewegen?

Um das Problem der Begriffsbestimmung hier angehen zu können, müssen vorher zwei Teildisziplinen der Biologie strikt voneinander getrennt werden. Dies ist einerseits die **Taxonomie**. Sie beschäftigt sich damit, die Organismen (Arten) und verwandtschaftlichen Organismengruppen (Gattungen, Familien etc.) in ihrer Unverwechselbarkeit gegeneinander abzugrenzen und mit jeweils nur *einem* korrekten wissenschaftlichen Namen zu belegen. Die **Systematik** hingegen versucht, die verwandtschaftlichen Beziehungen der einzelnen Spezies zueinander, sprich deren Rückführbarkeit auf gemeinsame Vorfahren, aufzuklären.

1. Der Begriff „Pflanze“ im ökologischen Sinne unterscheidet sich wesentlich vom jenem im Sinne der Systematik. Hier seien unter Pflanzen Organismen verstanden, die im Allgemeinen aus anorganischen Stoffen organische aufzubauen vermögen.

1.2.1 Das Fünf-Reiche-Konzept

Zur groben Gliederung der Organismenwelt wurde bis in jüngste Zeit der Begriff „Reich“ als höchste systematische Kategorie verwendet. Bereits LINNÉ unterschied in seinem "Systema naturae" von 1735 zwischen dem „regnum minerale“ (Steine wachsen), dem „regnum vegetabile“ (Pflanzen wachsen und leben) und dem „regnum animale“ (Tiere wachsen, leben und fühlen).

Einen vorläufigen Höhepunkt erreichte dieses Einteilungsprinzip mit der Etablierung des 5-Reiche-Konzeptes von WHITTAKER (1974). Die Abb. 1.3 zeigt dieses in der Fassung von MARGULIS (1995). Hier wird die Einteilung der Organismenwelt in die Reiche Prokaryotae (= Monera, Archae- und Eubacteria), Protoctista, Pflanzen, Tiere und Pilze mit ihren jeweiligen funktionellen und strukturellen Charakteristika dargestellt. Am Übergang zwischen den Prokaryotae und den Protoctista ist die Entstehung der Eucaryoten (Organismen mit Zellkern) aus den Eubacteria durch Endosymbiosen² zu sehen. Ein relativ großer, amöboid beweglicher, wandelloser Ureuzyt hat sich Prokaryoten „einverleibt“ und in sein zelluläres Funktionsgefüge integriert. Die Plastiden der Pflanzen leiten sich in ähnlicher Weise von Cyanobakterien ab.

-
2. Die Endosymbiontentheorie geht davon aus, dass Mitochondrien und Chloroplasten sich aus eigenständigen prokaryotischen Lebewesen entwickelt haben. Im Zuge des Evolutionsprozesses sind diese Einzeller eine Endosymbiose mit einer eukaryotischen Zelle eingegangen, sie leben in ihrer Wirtszelle zum gegenseitigen Vorteil. Auch heute noch kann man beobachten, dass amöboide Einzeller Cyanobakterien aufnehmen ohne sie zu verdauen. Das Zusammenspiel der beiden zellulären Organismen hat sich dann im Verlauf der Evolution zu einer gegenseitigen Abhängigkeit entwickelt, in der keiner der beiden Partner mehr ohne den anderen überleben konnte. Diese Abhängigkeit geht so weit, dass die Organellen Teile ihres genetischen Materials verloren. Genetische Vergleiche deuten darauf hin, dass Chloroplasten von Cyanobakterien und Mitochondrien von aeroben Purpurbakterien abstammen.

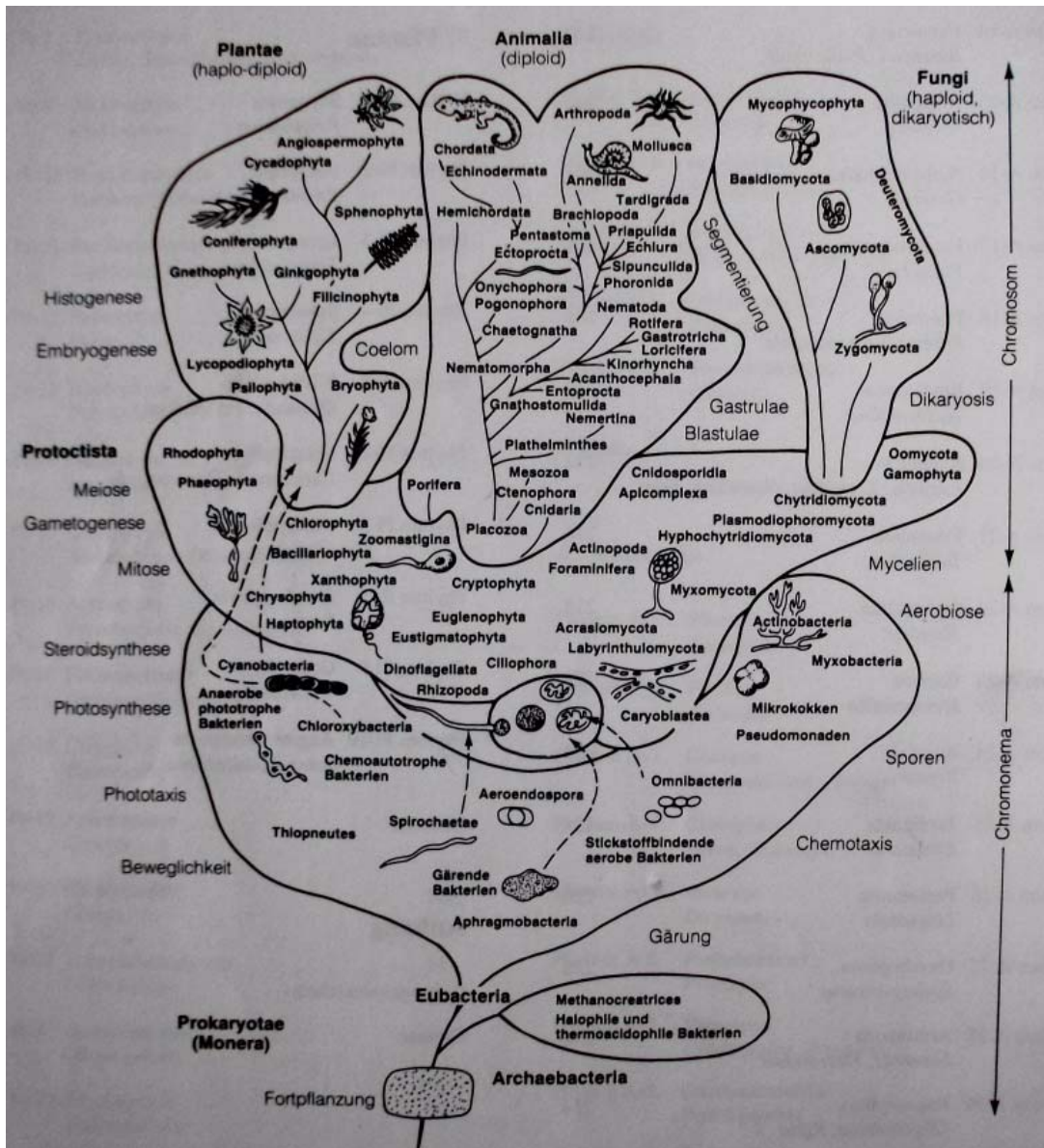


Abb. 1.3: Die fünf Reiche der Organismenwelt. Die Darstellung baut auf dem Fünf-Reiche-Konzept von WHITTAKER (1974) sowie der Symbiontentheorie vom Ursprung eukaryotischer Zellen auf. *Quelle: MARGULIS (1995)*

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass moderne Ergebnisse der Systematik zeigen, dass die scheinbar so klar umrissenen Reiche an sich wiederum sehr heterogen sind und in vielen Fällen keine natürlichen Abstammungsgemeinschaften darstellen. Darum wird inzwischen mehr und mehr von dieser Einteilung abgerückt. Die Organismenwelt wird inzwischen in zahlreiche (derzeit über 30) gleichberechtigt nebeneinanderstehende Stämme (Phyla) untergliedert.

Die folgende Tabelle charakterisiert die vier Reiche der Eukaryoten bezüglich wichtiger physiologischer und cytologischer Befunde:

	Protoctista		Plantae	Animalia	Fungi*
	Protozoa *	Chromista *			
Ernährung	auto- und heterotroph	Autotroph	autotroph	heterotroph	heterotroph
Zellwände	- (in trophischer Phase), sonst variabel	+ (meist Zellulose)	+ (meist Zellulose)	-	+ (meist Chitin oder Glucan)
Mitochondrien	Tubulus-Typ	Tubulus-Typ	Crista-Typ	Crista-Typ	Crista-Typ
Flimmergeißeln	+	+	-	-	-

*Gruppen in denen Organismen enthalten sind, die landläufig als Pilze bezeichnet werden

Leider löst die Definition von Begriffen wie „Pflanze“ und „Tier“ im Sinne der Systematik nicht die Probleme im Sinne der Ökologie.

„Pflanzen“ als Organismen, die aus anorganischen Stoffen organische aufbauen können, finden sich nicht nur im Reich Plantae. Cyanobacteria spielen z. B. in aquatischen Ökosystemen als Primärproduzenten eine wesentliche Rolle.

Pflanzenfressende „Tiere“ beschleunigen den Stoffumsatz, indem sie frei bewegliche Biomasse transportieren und umwandeln. Dadurch tragen sie wesentlich zur Beschleunigung der Stoffumsätze bei. Sie finden sich im System der Organismenwelt aber nicht nur bei den Animalia. Ihre Funktion für das Ökosystem wird auch bereits durch Vertreter der Protoctista erfüllt.

Erreichen „Pflanzen“ als Primärproduzenten (und natürlich auch die Konsumenten) die Grenzen ihres Zeithorizontes und sterben ab, fällt tote organische Biomasse an. Die Funktion der Destruenten wird durch zahlreiche Vertreter der Procaryotae, Protoctista, Animalia und Fungi (Pilze) erfüllt.

Die herkömmlichen Bezeichnungen Pflanze-Tier-Pilz-Bakterie werden daher in der Ökologie durch die Begriffe „Primärproduzent“, „Konsument“ und „Destruent“ abgelöst, die eine bestimmte Funktion im Ökosystem widerspiegeln, unabhängig von der systematischen Stellung des Organismus, der diese Funktion ausübt.



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Prof. Dr.-Ing. habil. Kerstin Thurow
Prof. Dr.-Ing. Norbert Stoll
Dipl.-Ing. (FH) Stefanie Hagemann

Umweltmesstechnik

Universität Rostock

Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Definition und Einteilung der Messtechnik	7
1.2	Aufbau und Merkmale von Messsystemen	8
1.3	Besonderheiten der stofflichen Messtechnik	9
1.4	Sensoren und Sensorsysteme als Teil von Messsystemen	14
1.4.1	Definition von Sensoren und Sensorsystemen	14
1.4.2	In-Line-, On-Line-, Off-Line-Sensorik, Remote Sensing	16
1.4.3	Sensoren in der stofflichen Messtechnik	18
1.4.4	Einzelsensoren	18
1.4.5	Komplexe Sensorsysteme	23
2	Physikalische Messtechnik – Messung nichtelektrischer Größen	27
2.1	Einführung	27
2.2	Temperatursensorik	27
2.2.1	Thermoelemente	28
2.2.2	Metallwiderstandsthermometer	29
2.2.3	Halbleiter	30
2.2.4	Weitere Temperatursensoren	32
2.3	Drucksensorik	32
2.3.1	Druckmessumformer nach dem DMS-Prinzip	32
2.3.2	Druckmessumformer nach dem kapazitiven Prinzip	33
2.3.3	Druckmessaufnehmer nach dem Prinzip der Resonanzfrequenz- messung	35
2.3.4	Weitere Druckmessverfahren	36
2.4	Durchflusssensorik	36
2.4.1	Durchflussmessung auf thermischer Grundlage	36
2.4.2	Magnetisch-induktive Durchflussmessung	37
2.5	Bestimmung von Dichte und Viskosität	38
2.5.1	Methoden zur Dichtebestimmung	38
2.5.1.1	Wägemethoden	38
2.5.1.2	Auftriebsmethoden	39
2.5.1.3	Radiometrische Dichtemessung	40
2.5.1.4	Resonanz- und Schwingungsdichtemessungen	40

2.5.2	Methoden zur Viskositätsbestimmung	41
2.5.2.1	Kapillarviskosimeter	41
2.5.2.2	Rotationsviskosimeter	42
2.5.2.3	Kugelfallviskosimeter	42
2.5.2.4	Schwingungsviskosimeter	42
2.6	Feuchtebestimmung	43
2.6.1	Kapazitive Feuchtebestimmung	43
2.6.2	LiCl-Hygrometer	44
2.6.3	Elektrolysehygrometer	45
2.6.4	Neutronen-Feuchtesensor	45
3	Umweltrelevante Stoffe und ihr Eintrag in die Ökosphäre	47
4	Stoffliche Messtechnik	51
4.1	Konzept der prä-, intra- und postsensorischen Selektivität	51
4.2	Präsensorische Selektivierung	52
4.2.1	Probenahme	52
4.2.1.1	Allgemeine und grundsätzliche Gesichtspunkte	52
4.2.1.2	Probenahme von Feststoffen	57
4.2.1.3	Probenahme von Flüssigkeiten	58
4.2.1.4	Probenahme von Gasen	59
4.2.2	Mechanische Trennungen	60
4.2.2.1	Filtration	60
4.2.2.2	Zentrifugation	63
4.2.3	Extraktionsverfahren	66
4.2.3.1	Fest-Flüssig-Extraktion	67
4.2.3.2	Supercritical Fluid Extraktion	67
4.2.3.3	Thermische Extraktionen mittels Headspace-und Thermodesorptions-Technik	68
4.2.4	Chromatographie	70
4.2.4.1	Gaschromatographie	72
4.2.4.2	Hochdruck-Flüssigchromatographie	73
4.2.5	Kapillarelektrophorese	75
4.3	Intrasensorische Selektivierung	77
4.3.1	Atomspektroskopie	78
4.3.1.1	Röntgenfluoreszenzspektroskopie	78
4.3.1.2	Atomemissions- und Atomabsorptionsspektroskopie	81
4.3.2	Optische Molekülspektroskopie	82
4.3.3	Massenspektrometrie	83

4.3.3.1	Einfluss von Ionisierungsprinzipien auf die Selektivität der Massen-spektrometrie	84
4.3.3.2	Selektivität durch charakteristische Isotopenmuster ...	85
4.3.3.3	Selektivität durch exakte Massenbestimmung mittels Hochauflösender Massenspektrometrie	86
4.3.3.4	Selektivität durch Bestimmung von Fragmentierungswegen mittels MS / MS - Untersuchungen	88
4.3.4	Elektrochemische Methoden	88
4.3.5	Potentiometrische Methoden	88
4.4	Postsensorische Selektivierung	90
4.4.1	Automatische Spektrenauswertung in der IR-Spektroskopie	91
4.4.2	Interpretation von Massenspektren	91
4.4.3	Rechnergestützte Interpretation hochaufgelöster Massenspektren	95
4.4.4	Kombinierte Automatische Auswertung von Daten unterschiedlicher Messsysteme	96
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	101

1 Einführung

Die messtechnische Bestimmung von *physikalischen* Größen hat eine lange Tradition in den Ingenieurwissenschaften, seit W. v. SIEMENS 1860 einen Kupferwiderstand zur Temperaturmessung benutzte. Mit der Industrialisierung und Entwicklung großtechnischer Prozesse in den 20 - 40er Jahren unseres Jahrhunderts entstand ein großer Bedarf an moderner Messtechnik und Sensorik. Die Halbleiterentwicklung seit Beginn der 50er Jahre brachte einen neuen Innovationsschub in der Sensortechnologie. Seit den 70er Jahren spielt die Automatisierung von Prozessen eine immer größere Rolle in der Entwicklung von Mess- und Sensorsystemen und treibt deren Entwicklung in immer kürzer werdenden Innovationszyklen voran. Grundsätzliche Bestimmungen zur Wahl der messtechnischen Begriffe sind in DIN-Vorschriften geregelt /1/.

1.1 Definition und Einteilung der Messtechnik

Die Messtechnik ist heute ein interdisziplinäres Wissenschaftsgebiet, das sich „*beim Messvorgang mit der Erfassung und Darstellung von physikalischen Größen und der Zuordnung einer Maßzahl*“ befasst /1, 2/. Dazu müssen die zu messenden Größen eindeutig bestimmt und das Messnormal durch eine Konvention festgelegt sein /1-3/. Die Messung der physikalischen Größen erfolgt mit geeigneten Messsystemen; die Messung der Messgröße umfasst dabei nach DIN 1319 die „Ausführung aller Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit“ /1/.

Für die Generierung der Einheiten werden Normale eingesetzt. 1948 gab es mit der Etablierung des MKSA-Systems die Definition von vier Grundnormalen (Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere), die heute noch als Grundnormale mit teilweise veränderter Definition Bestand in der Messtechnik haben. 1960 erfolgte eine Erweiterung auf insgesamt sieben Grundnormale (SI-Basiseinheiten), die in Tabelle 1-1 zusammengefasst sind. Von den SI-Basiseinheiten leiten sich verschiedene weitere Einheiten ab /2/. Mit der Festlegung der Stoffmenge als Grundnormal wurde 1960 erstmals eine verbindliche quantitative Definition einer stofflichen Größe vorgenommen. Die Anwendung dieser Größe setzt voraus, dass eine stoffliche Menge einer eindeutig definierten stofflichen Spezies gemessen wird.

Tabelle 1.1: SI-Basiseinheiten (nach /2/)

Größenart	Einheit	Kurzzeichen	Definiert durch
Länge	Meter	M	Lichtgeschwindigkeit und Zeit
Zeit	Sekunde	S	Periodendauer einer Strahlung
Masse	Kilogramm	Kg	Prototyp
Elektr. Stromstärke	Ampere	A	Kraft zwischen parallelen Leitern
Temperatur	Kelvin	K	Tripelpunkt des Wassers
Lichtstärke	Candela	Cd	Strahlung des schwarzen Körpers
Stoffmenge	Mol	mol	Atomzahl (^{12}C in 12 g)

Die moderne Messtechnik ist gekennzeichnet von einer Vielfalt an Aufgaben, Einsatzfeldern und Zielstellungen. Eine Unterteilung der Messtechnik ist daher zweckmäßig, auch wenn sich aufgrund der Überlagerung verschiedener Gebiete dafür keine allgemeingültige Nomenklatur anwenden lässt. Eine mögliche Unterteilung der industriellen Messtechnik ist die **Betriebs-, Labor- und Fertigungsmesstechnik** /4/. Darüber hinaus kann die industrielle Messtechnik auch in **Prozessmesstechnik** (Messung verfahrenstechnischer Prozessgrößen wie Temperatur, Druck, Füllstand etc.), **Fertigungsmesstechnik** (Messung von Längen, Winkeln, Oberflächen etc.) und **Analysenmesstechnik** (Messung von Stoffeigenschaften und Stoffkonzentrationen) unterschieden werden. Daneben ist auch eine Unterscheidung nach den zu messenden Größen möglich. Eine wichtige Disziplin ist die Elektrische Messtechnik, die die „Messung elektrischer und magnetischer Größen ... und ebenso die Messung nichtelektrischer Größen über die Abbildung auf elektrische Größen, was heute summarisch als Sensortechnik bezeichnet wird“ umfasst.

1.2 Aufbau und Merkmale von Messsystemen

Messungen werden durch Messsysteme realisiert, die in der Regel auf drei wesentliche Grundstrukturen zurückzuführen sind, aber auch komplexe innere Strukturen aufweisen können. Ein wesentlicher Bestandteil des Messsystems ist der messtechnisch zu verfolgende Prozess, der durch das Messobjekt selbst repräsentiert wird. In der stofflichen Messtechnik ist wegen der großen Komplexität der Aufgabenstellung nach der Messwertausgabe häufig ein Informationsverarbeitungs- und -interpretationsvorgang erforderlich.

Messsysteme werden durch verschiedene Eigenschaften charakterisiert, die im Wesentlichen in der DIN 1319 zusammengefasst sind /1/.

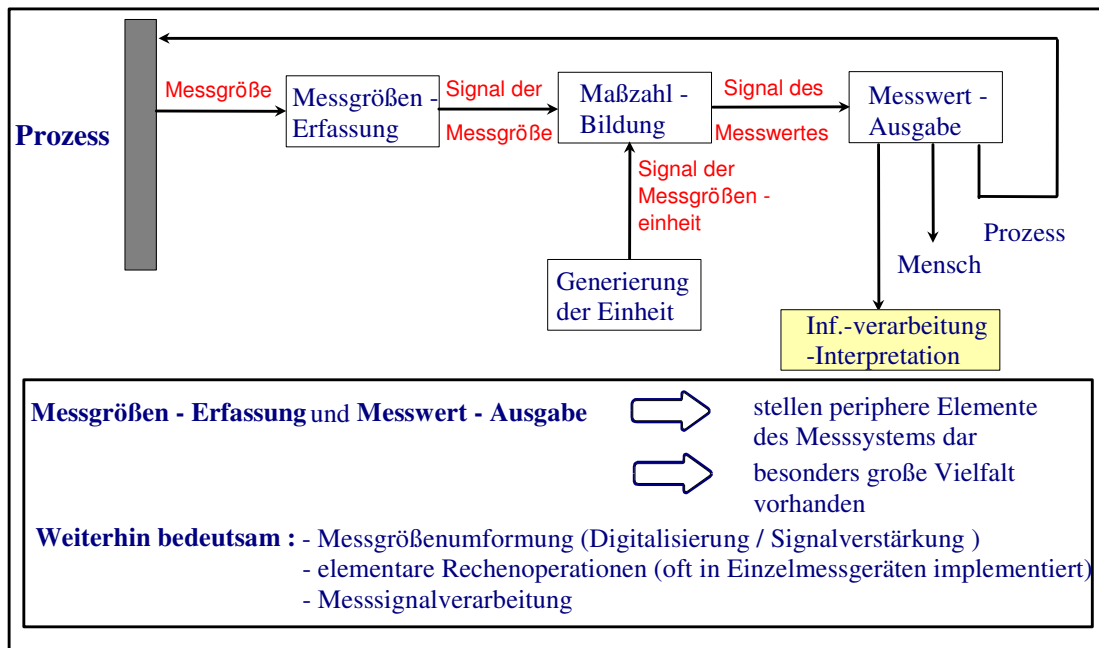


Abb. 1.1: Funktionselemente von Messsystemen

1.3 Besonderheiten der stofflichen Messtechnik

Die Definition der stoffrelevanten Messtechnik lässt mehrere Interpretationen zu. Einerseits bedeutet sie den Einsatz physikalischer Methoden zur Erzielung sensorischer Effekte für die messtechnische Bestimmung stofflicher Eigenschaften, andererseits bezieht sie die Fähigkeit des Aufdeckens stofflicher Strukturen und eine dieser zuzuordnenden Quantifizierung in ihr Aufgabengebiet ein. Eine Einengung der stofflichen Messtechnik auf die Messaufgabe der Konzentrationsmessung ist nicht sinnvoll, da Stoffeigenschaften vielfach als Messgröße für die Stoffzusammensetzung dienen /5/.

Obwohl in der Messtechnik die zu messenden physikalischen Größen allgemein eindeutig definiert sind, gibt es bislang bis auf die Definition der Stoffmenge keine in SI-Definitionen festgelegten Normale für stoffliche Parameter.

Abbildung 1-2 zeigt die hierarchische Ordnung von stofflichen Spezies, die messtechnisch von Bedeutung sind. Im Bereich der Untersuchung von Molekülen spielen die der messtechnischen Verfolgung zugrunde liegenden Stoffeigenschaften eine wesentliche Rolle. Dabei ist insbesondere der strukturelle Aufbau von entscheidender Bedeutung. Der

Schwierigkeitsgrad der Messaufgabe nimmt von den molekular unähnlichen zu den isomeren Verbindungen - insbesondere zu den chiralen Verbindungen - stetig zu. Die Tatsache, dass es bereits heute weit mehr als 10^7 bekannte Verbindungen gibt, zeigt, dass es sich hier um eine aufwendige messtechnische Fragestellung handelt, die Struktur einer Verbindung mit der Fehlerwahrscheinlichkeit eines „Fingerabdrucks“ zu erkennen bzw. zu identifizieren.

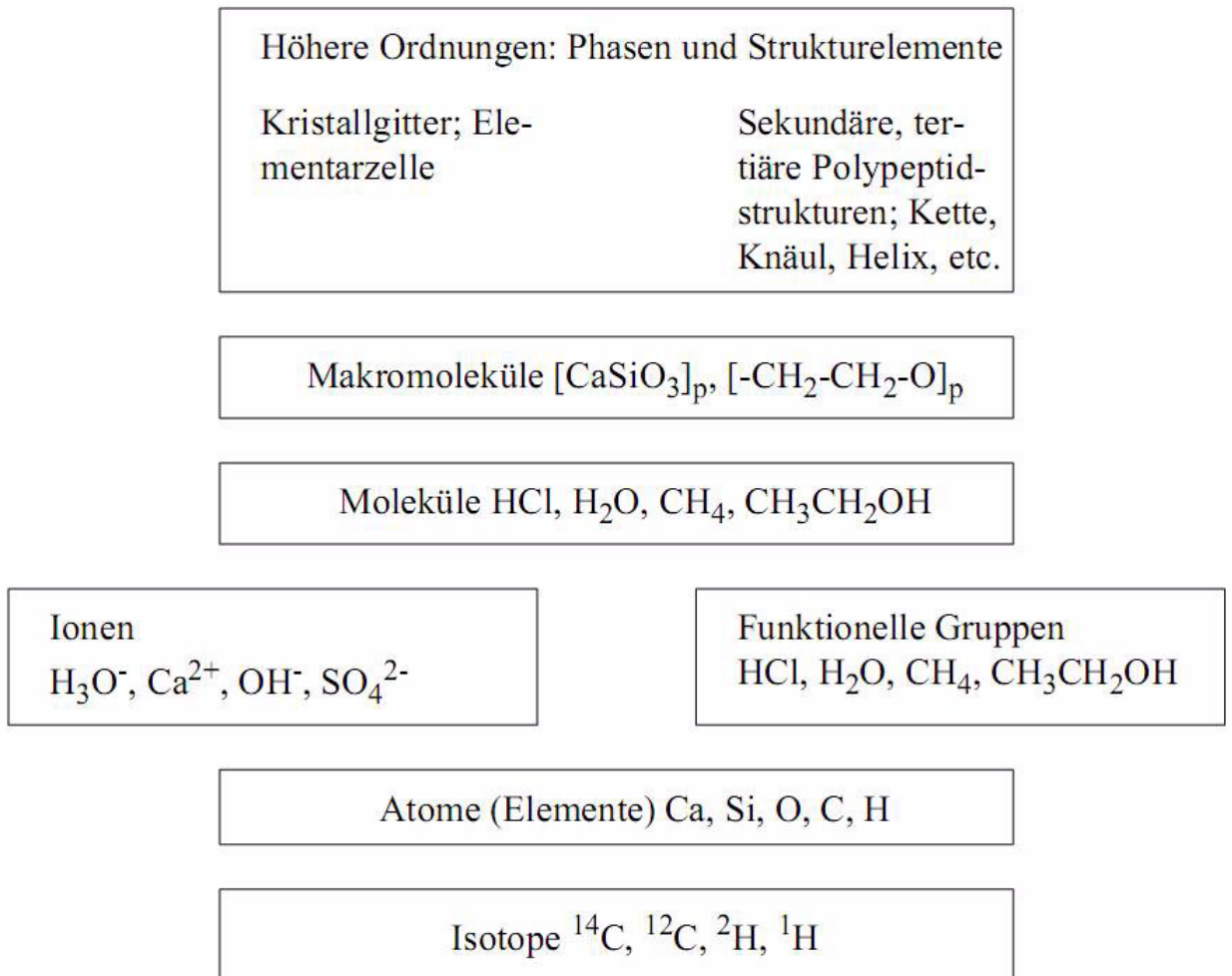


Abb. 1.2: Hierarchische Ordnung stofflicher Spezies /6/

Maßgebliche Besonderheiten der stofflichen Messtechnik sind deshalb die außergewöhnlichen Anforderungen an **Spezifität** und **Selektivität** /4, 7, 8, 9/. Beide Begriffe sind bislang nicht als charakteristische Eigenschaften von Messsystemen in der DIN 1319 definiert.

Für Einzelsensoren kann zunächst die Querempfindlichkeit E_Q definiert werden als /4, 7/:

$$E_Q = \Delta y_{st} / \Delta C_{st} \quad (1-1)$$

Die Querempfindlichkeit bezogen auf die Empfindlichkeit E , kann als **Selektivität** S bezeichnet werden:

$$S = 1 - \frac{E_Q}{E} = 1 - \frac{\Delta y_{st} * \Delta C_M}{\Delta C_{st} * \Delta y_M} \quad (1-2)$$

(Δy_{st} – Anteil der Störkomponente am Ausgangssignal; Δy_M – Anteil der Messkomponente am Ausgangssignal; ΔC_{st} – Konzentration der Störkomponente; ΔC_M – Konzentration der Messkomponente)

Messsysteme, die bezüglich einer Messkomponente besonders empfindlich sind und nur eine geringe Querempfindlichkeit zeigen, haben eine hohe Selektivität. Eine Selektivität $S = 1$ ist charakteristisch für spezifische Messverfahren. **Spezifität** bedeutet demnach, dass das Messergebnis eines Signales nicht durch Querempfindlichkeiten gestört wird, was in der Praxis aber schwer erreichbar ist /4/.

Die **Selektivität** kann auch als Verhältnis der Empfindlichkeit eines Signales a in Bezug auf die eines Signales b /9/. Mit der Definition der Empfindlichkeit folgt bei gleich großer Änderung von zwei Eingangssignalen a und b :

$$S = \frac{E_a}{E_b} = \frac{\Delta y_a * \Delta x_b}{\Delta x_a * \Delta y_b} = \frac{\Delta y_a}{\Delta y_b} \quad (1-3)$$

D.h. die Selektivität beschreibt bei gleicher Änderung der Eingangsgrößen x_a und x_b das Verhältnis der Ausgangsgrößen zweier Signale a und b .

Für mehrkanalige Systeme kann eine Definition von Spezifität und Selektivität gegeben werden, die eine Empfindlichkeitsmatrix zugrunde legt. Mit der Definition der Empfindlichkeit als Verhältnis von Ausgangsgröße y und Eingangsgröße x gemäß

$$(1-4) \quad E = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

ergibt sich die Empfindlichkeitsmatrix eines n -kanaligen Sensors zu:

$$(1-5) \quad \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nn} \end{pmatrix}$$

Daraus folgt allgemein für eine Selektivitäts- / Spezifitäts-Beziehung:

$$(1-6) \quad \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11}X_1 + E_{12}X_2 + \dots + E_{1n}X_n \\ E_{21}X_1 + E_{22}X_2 + \dots + E_{2n}X_n \\ \dots \\ E_{n1}X_1 + E_{n2}X_2 + \dots + E_{nn}X_n \end{pmatrix}$$

(mit $X_1 \dots X_n$ als Eingangsgrößen.

Für den Spezialfall der *Spezifität* gilt, dass (idealerweise) nur eine Korrelation zwischen je einer Eingangs- und je einer Ausgangsgröße besteht, so dass die Empfindlichkeitsmatrix als Diagonalmatrix darstellbar ist:

$$\begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & E_{nm} \end{pmatrix} \quad (1-7)$$

Für einen spezifischen n-kanaligen Sensor ergibt sich somit:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} E_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & E_{nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11}X_1 + 0 + \dots + 0 \\ 0 + E_{22}X_2 + \dots + 0 \\ \dots \\ 0 + 0 + \dots + E_{nm}X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11}X_1 \\ E_{22}X_2 \\ \dots \\ E_{nm}X_n \end{pmatrix} \quad (1-8)$$

Typisches Beispiel derartiger spezifischer Systeme, die in dieser Form als Einzelsensoren realisiert wurden, sind Biosensoren. Sie liefern idealerweise nur für einen Stoff Antwortreaktionen (z. B. Glukosesensor /9/).

Selektivität und Spezifität können als ein Maß für die Ansprechcharakteristik eines Messsystems auf verschiedene Verbindungen angesehen werden. Im Hinblick auf die spezifischen bzw. selektiven Eigenschaften von stofflichen Messsystemen ist folgende Unterteilung möglich / 10/:

Spezifische Messsysteme: besitzen eine so hohe Selektivität, dass sie struktur- oder elementspezifisch quantitative Messungen ermöglichen.

Selektive Messsysteme: können durch ihr Wirkungsprinzip bedingt durch spezielle physikalische Eigenschaften elementspezifisch oder strukturselektiv sein /11/.

Universelle Messsysteme: haben für ein breites Spektrum unterschiedlicher Stoffe ein ähnliches Ansprechverhalten. Man kann zwischen universellen Messsystemen mit konstanter und veränderbarer Selektivität unterscheiden.

Bei der großen Zahl unterschiedlicher Verbindungen ist für die *eindeutige* Identifizierung und Quantifizierung stofflicher Spezies eine außergewöhnlich hohe Selektivität erforderlich. Selbst wenn man sich

auf die elementselektive Aufgabenstellung bezieht, heißt dies bei ca. 10^2 (messtechnisch relevanten) unterschiedlichen Elementen, dass an die Selektivität der Messsysteme erhebliche Anforderungen gestellt werden müssen.

Ein für die stoffliche Messtechnik typisches, in seiner Bedeutung nicht zu unterschätzendes Teilproblem, ist die **Probenahme** aus dem Prozess und die **Probenaufbereitung** /4, 11-12/. Beide Begriffe sind in der VDI/VDE-Richtlinie 3516 sowie der europäischen Norm DIN IEC 66D (CO)12 festgelegt /13, 14/. In Abhängigkeit von Problemstellung und Zielsetzung sind entsprechende Probenahmestrategien zu erarbeiten. Die DIN/ISO-Normen 10381-1-4 leisten dabei einen wichtigen Beitrag /15/. Probenaufbereitungen sind ein typisches Merkmal von Sensorsystemen in stofflichen Prozessen /16/. Ziel der Probenaufbereitung ist es, das Messgut so vorzubereiten, dass das eingesetzte Messgerät nicht geschädigt sowie der Messvorgang nicht beeinträchtigt wird. Wesentlicher Schritt ist dabei die Entfernung von Störkomponenten, die bei ungenügender Selektivität einen Beitrag zum Ausgangssignal des Sensors liefern können /5/. Für die Aufbereitung gasförmiger und flüssiger Proben wurde eine Vielzahl von Verfahren beschrieben /2, 4, 5, 12, 17/, die neben mechanischen Methoden wie Filtration, Zentrifugation, Kondensation etc. auch eine chemische Umwandlung in durch den Sensor messbare Komponenten beinhalten können /5/.

Der Transportvorgang der Messprobe zum Analysator ist eine weitere wesentliche Besonderheit in der stofflichen Messtechnik.

Zu beachten ist bei allen Verfahren von Probenahme, -aufbereitung und -transport, dass durch den Eingriff in den Prozess die Probe in ihrer Zusammensetzung verändert und / oder aus ihrem Umfeld entfernt wird /5/.

1.4 Sensoren und Sensorsysteme als Teil von Messsystemen

1.4.1 Definition von Sensoren und Sensorsystemen

Die Erfassung nichtelektrischer Größen erfolgt mit Sensoren, die als ein primäres Element der Messeinrichtung agieren und das Interface zwischen den Informationen des Prozesses und dem zur Messwerterfassung und -verarbeitung eingesetzten Digitalrechner darstellen. Es sind Konstellationen mit unterschiedlichem Integrationsgrad denkbar, die der technischen Entwicklung Rechnung tragen.

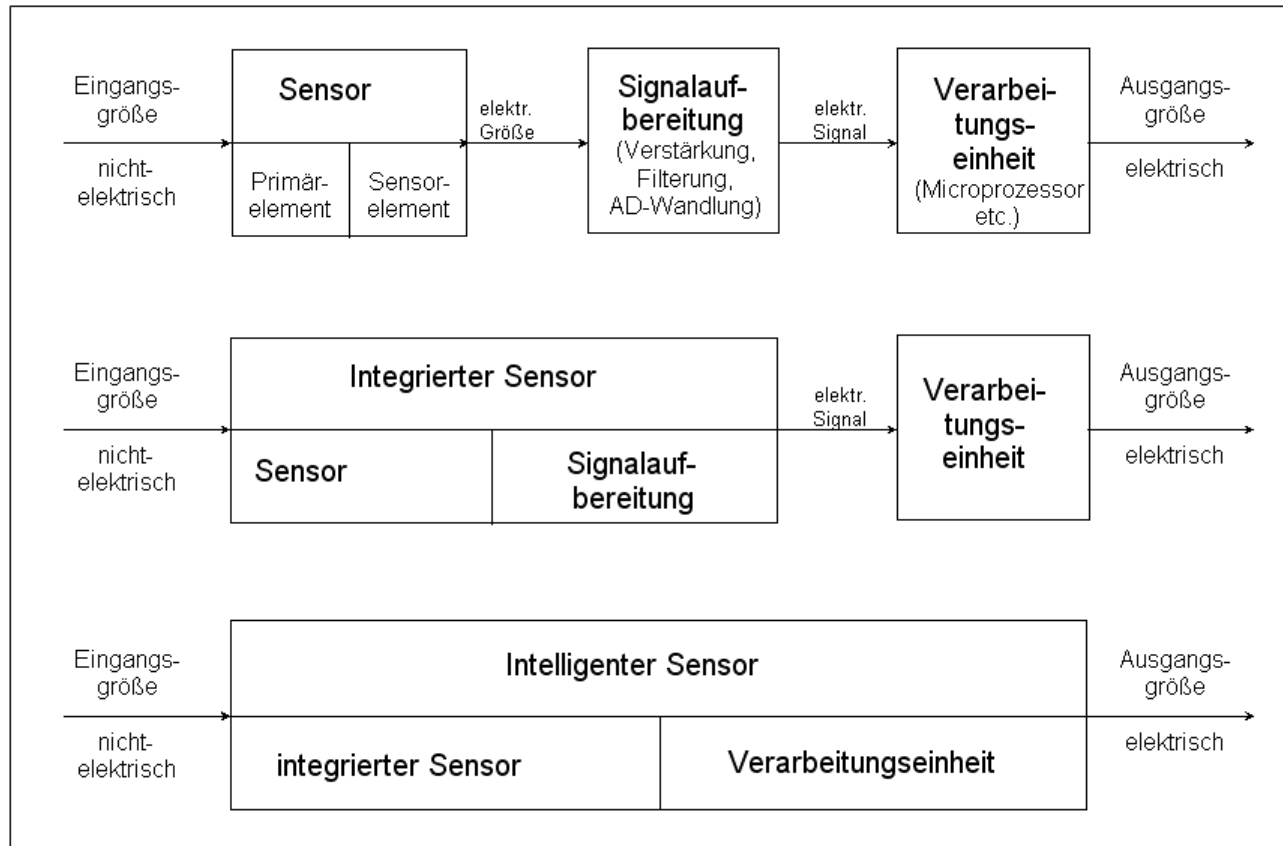


Abb. 1.3: Arten möglicher Sensorsysteme: 1 – Sensorsystem diskreter Aufbau; 2 – Sensorsystem mit integriertem Sensor; 3 – intelligentes Sensorsystem oder intelligenter Sensor /18/

Die erstmalige verbindliche Definition eines Sensors aus dem Jahr 1975 /8, 16/ schließt sich folgerichtig an den damaligen Stand der technischen Entwicklung an und beschreibt einen Sensor als „ein Gerät, das ein verwertbares Ausgangssignal liefert, das in Zusammenhang mit der zu messenden Größe steht“. Die Ausgangsgröße ist dabei stets ein elektrisches Signal und die Messgröße eine physikalische Quantität oder Eigenschaft. Die Aufweitung des Sensorbegriffs auf stoffliche Größen ist noch relativ jung und wurde erst um 1990 vorgenommen /16/. Sie bezieht auch chemische und biologische Quantitäten als Messgrößen ein und beschreibt das Ausgangssignal als nicht notwendigerweise elektrisch.

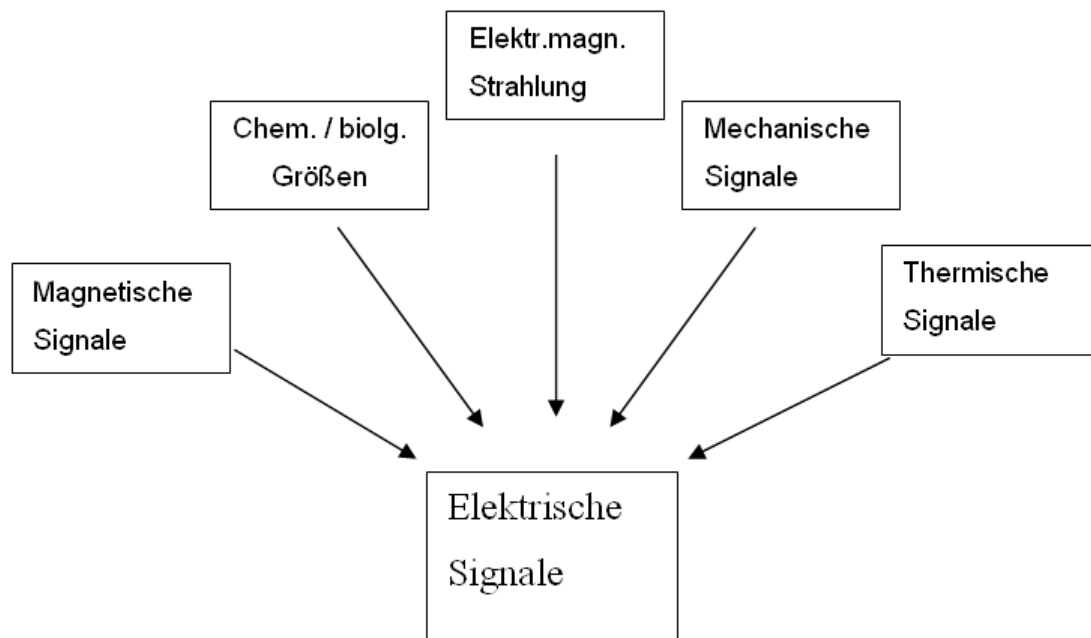


Abb. 1.4: Physikalische Größen, die von Sensoren in elektrische Signale umgewandelt werden (nach /18/)

1.4.2 In-Line-, On-Line-, Off-Line-Sensorik, Remote Sensing

In Bezug auf die Kopplung von Sensorsystemen an den Prozess können die Varianten in-line (oder in-situ), on-line (oder extraktiv) und off-line Sensorik sowie das Remote Sensing unterschieden werden /4, 16, 17/.

Die ursprüngliche Form der Sensorik ist durch die *in-line-Variante* geprägt, bei der die Messung der nichtelektrischen Größen direkt im Prozess geschieht.

Die o. g. Prozesse von Probenahme, -aufbereitung und -transport stellen eine Besonderheit der stofflichen Messtechnik dar. Im Gegensatz zur klassischen in-line-Sensorik tritt daher in der stofforientierten Messtechnik im Allgemeinen die *on-line-Sensorik* mit einem Stofftransport zum bzw. durch das jeweilige Sensorsystem in den Vordergrund (siehe Abbildung 1-5). Dadurch können Verzögerungs- und Totzeiten in der messtechnischen Bestimmung auftreten, die die Echtzeitfähigkeit bei der Verfolgung der Prozessdaten beeinflussen können. In der Prozessmesstechnik besteht daher ein großes Bestreben für die Entwicklung

von in-line-Sensoren bzw. entsprechenden Sensorsystemen. Derartige Systeme stehen bereits für einige Anwendungen zur Verfügung /5/.

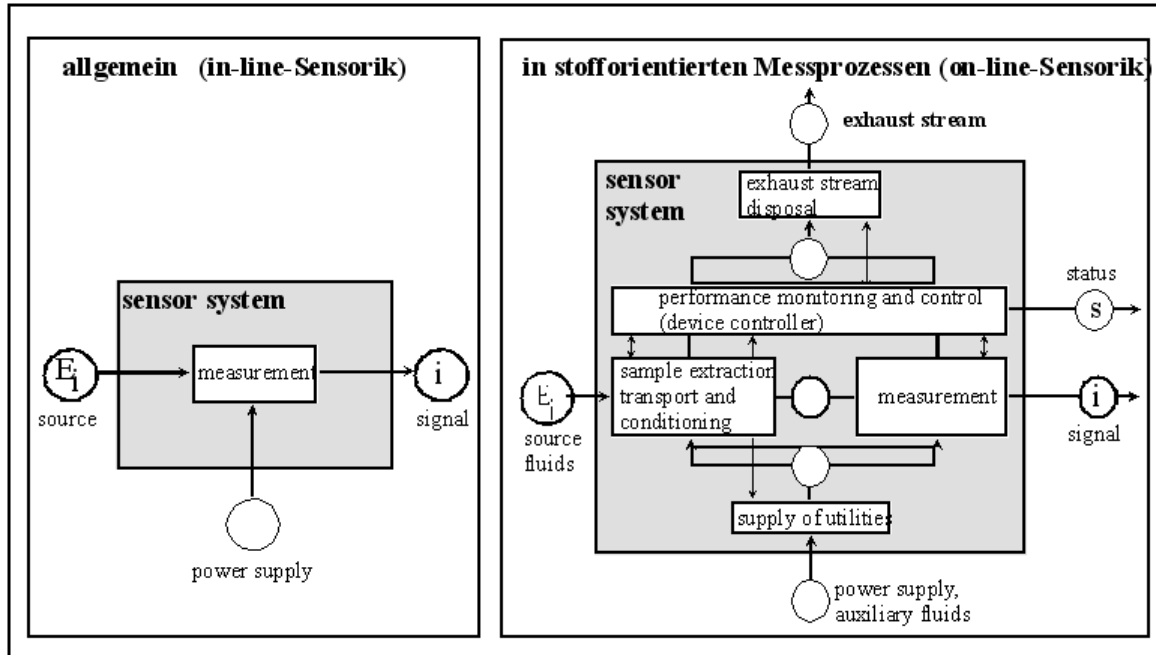


Abb. 1.5: Strukturen von Sensorsystemen nach /16/

Sehr oft muss die *off-line-Sensorik* eingesetzt werden, bei der die zu untersuchende Probe zur Messung aus dem realen Prozess entnommen wird. Dieses Verfahren wird in der Regel eingesetzt, wenn Multikomponentensysteme in komplexer Matrix untersucht werden sollen /4/. Tabelle 1-2 zeigt eine Zusammenstellung der Charakteristika der drei Methoden.

Tabelle 1.2 : Charakterisierung von in-line, on-line und off-line Messverfahren (nach /16/)

	In-line, in situ	On-line, extraktiv	Off-line
Probenahme	nicht erforderlich	Automatisch	Manuell
Probentransport	nicht erforderlich	Automatisch	Manuell
Probenaufbereitung	nicht erforderlich	Automatisch	manuell / automatisch
Messung	Automatisch	Automatisch	manuell / automatisch
Datenpräsentation	Automatisch	Automatisch	manuell / automatisch
Verfügbarkeit der Ergebnisse	Kontinuierlich	Kontinuierlich, Quasi-kontinuierlich	Diskontinuierlich

Der Bereich der *Remote Sensing - Verfahren* ermöglicht die messtechnische Bestimmung nichtelektrischer Größen ohne direkte Verbindung zwischen Messeinrichtung und Messobjekt /16/. Dabei kann zwischen

passiven und aktiven Methoden unterschieden werden. Passive Verfahren werden in der physikalischen Messtechnik z.B. zur Bestimmung von Temperaturverteilungen (thermographische Verfahren) genutzt. Zu den aktiven Remote Sensing-Verfahren gehören das Light Detection and Ranging (LIDAR) zur messtechnischen Bestimmung atmosphärischer Verunreinigungen /16/ und FTIR-Verfahren.

1.4.3 Sensoren in der stofflichen Messtechnik

In der stofflichen Messtechnik muss berücksichtigt werden, dass Messsysteme für die einzelnen existierenden Spezies unterschiedliche Ansprechempfindlichkeiten haben können. Sensoren müssen daher bestimmte Anforderungen bzgl. Empfindlichkeit, Selektivität, Messbereich, Stabilität und Ansprechcharakteristik erfüllen. Idealerweise sollte ein Sensor je nach Aufgabenstellung

- entweder alle Verbindungen mit gleicher oder ähnlicher Empfindlichkeit (*Universalsensor*) oder
- nur einzelne interessierende Verbindungen (*spezifischer Sensor*) detektieren und
- sehr kleine Stoffmengen zur Spurenanalyse erfassen

können.

1.4.4 Einzelsensoren

Einzelsensoren können sehr spezifisch auf nur eine bestimmte Verbindung abgestimmt sein, d.h. sie zeigen in diesem Falle nur eine geringe Querempfindlichkeit. Messobjekte können physikalischer, chemischer oder biologischer Natur sein, aber auch die Transducer-Prinzipien variieren in einem breiten Spektrum. Die Bestimmung stofflicher Spezies mit Einzelsensoren ist oftmals weniger selektiv, als dies beim Einsatz spezifischer chemischer Reaktionen, die in der Analytischen Chemie genutzt wurden, möglich ist. Der Vorteil von Sensoren liegt in ihren meist geringen Dimensionen und bei ihrer Massenproduktion in den geringen Kosten. Die Entwicklung von Einzelsensoren für alle derzeit existierenden Verbindungen ist nicht möglich und auch wirtschaftlich nicht effektiv.

Als **Chemische Sensoren** werden elektronische Bauteile bezeichnet, die einen chemischen Zustand in ein elektrisches Signal umwandeln /9/. Dabei werden als chemische Zustände vor allem Konzentration, Partialdruck und Aktivität von Teilchen (z.B. Atome, Ionen, Moleküle) bezeichnet /7, 8, 9, 18, 21, 22/

Für die Messung von Schadstoffen in Luft und Wasser stehen verschiedene optische, piezoelektrische und impedimetrische Sensoren zur Verfügung. Piezoelektrische Sensoren sind dabei häufig sehr sensitiv und nur wenig selektiv. Impedimetrische Sensoren mit Polymerbeschichtungen können insbesondere die Forderung nach niedrigem Energiebedarf erfüllen, weisen aber bislang keine ausreichende Selektivität auf. Ein umfangreiches Potential an elektrochemischen Sensoren steht für eine Vielzahl von Fragestellungen zur Verfügung /21/.

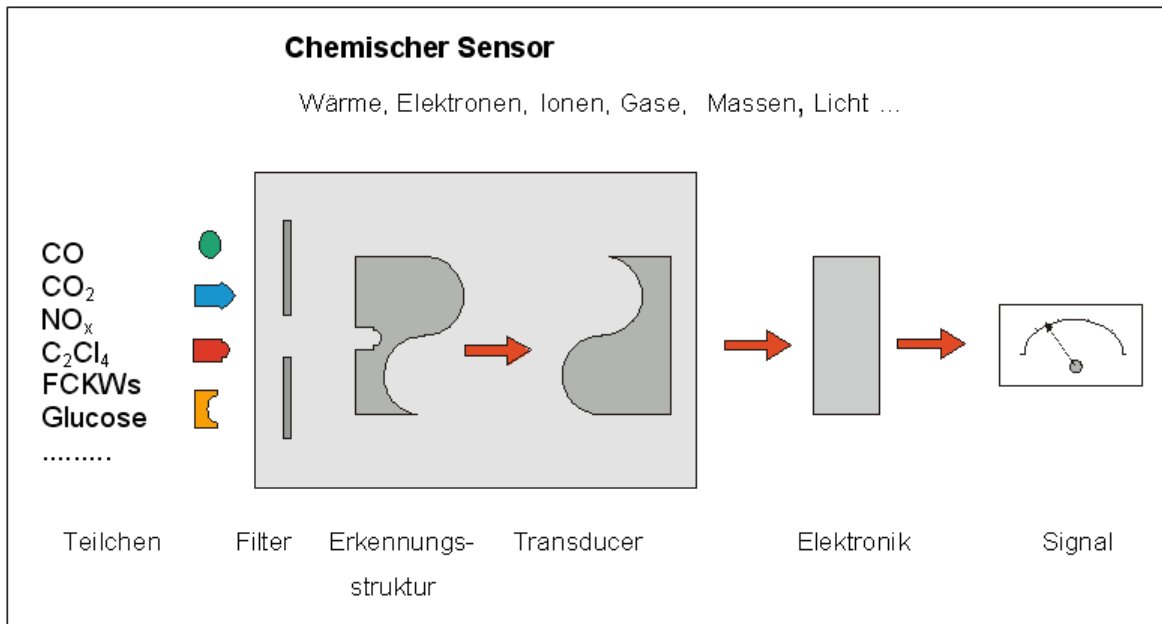


Abb. 1.6: Prinzip Chemischer Sensoren nach /21/

Die Sensortypen können nach ihren Messprinzipien klassifiziert werden /9/. Zu den typischen chemischen Sensoren gehören

- Flüssigelektrolytsensoren
- Festelektrolytsensoren
- Elektronische Leitfähigkeits- und Kapazitätssensoren
- Feldeffektsensoren
- Kalorimetrische Sensoren
- Optochemische und photometrische Sensoren sowie auch
- massenempfindliche Sensoren.

Neben chemischen Sensoren haben **Biosensoren** eine wesentliche Bedeutung erlangt, die auf verschiedenen Wirkprinzipien basieren /9, 18, 20, 21/.

In Biosensoren können z.B. katalytisch wirksame Enzyme die Erkennungselemente sein /21/. Oxidasen (z.B. Flavoproteine) benötigen Sauerstoff als Elektronenakzeptor. Als Sensorprinzip wird in Enzymelektroden der O_2 -Verbrauch gemessen (Clark-Elektrode) oder anodisch die Bildung von H_2O_2 verfolgt. Dehydrogenasen oxidieren mit Hilfe von Coenzymen (NAD^+ oder $NADP^+$) verschiedene Substrate. Durch elektrokatalytische Reoxidation des Coenzym an modifizierten Elektrodenoberflächen erhält man hierbei ein Substratproportionales amperometrisches Signal. In der Praxis werden hierzu häufig chinoide Systeme eingesetzt. Nachteil derartiger Elektroden ist ihre geringe Lebensdauer aufgrund von Auswaschungen der Coenzyme aus der Elektrodenoberfläche, so dass in neuerer Zeit vor allem an der Entwicklung geeigneter polymerer Trägersubstanzen gearbeitet wird. Eine weitere Gruppe von Enzymen, die zum Aufbau von Biosensoren geeignet sind, sind Hydrolasen bzw. Ligasen. Ihr Prinzip beruht auf der Änderung des pH-Wertes bei der Hydrolyse von Estern und Amiden bzw. auf der Änderung von Ammonium- bzw. Hydrogencarbonat-Konzentrationen durch verschiedene Reaktionen. Zur Detektion können potentiometrische Elektroden, Feldeffekttransistoren, Gas-sensitive Elektroden und pH-sensitive Optoden eingesetzt werden. Typisches Beispiel sind Harnstoff-Elektroden auf der Basis von Urease; analoge Systeme sind für die Bestimmung von Penicillin beschrieben worden. Unter den Lyasen finden vor allem Decarboxylasen und Ammoniak-Lyasen für die Bestimmung von Aminosäuren Anwendung.

Enzymreaktionen finden ihre praktische Anwendung vor allem in der klinischen Analyse zur Bestimmung von Glucose, Lactat, Cholesterol und Aminosäuren /20/. Darüber hinaus werden sie in der Lebensmittelqualitätsüberwachung und in Biotechnologieprozessen eingesetzt. Derzeit gibt es verstärkte Entwicklungen auf dem Gebiet der Umweltanalytik, so wurden z.B. Enzymsensoren für Phosphat, Nitrat, Phenole und organische Peroxide beschrieben. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen zur Entwicklung von Sensoren zur Pestizidbestimmung auf Grundlage der Hemmung von Cholinesterase. In der Biotechnologie haben außerdem Immunsensoren zur Bestimmung von Proteinen in Produktionsprozessen an Bedeutung gewonnen.

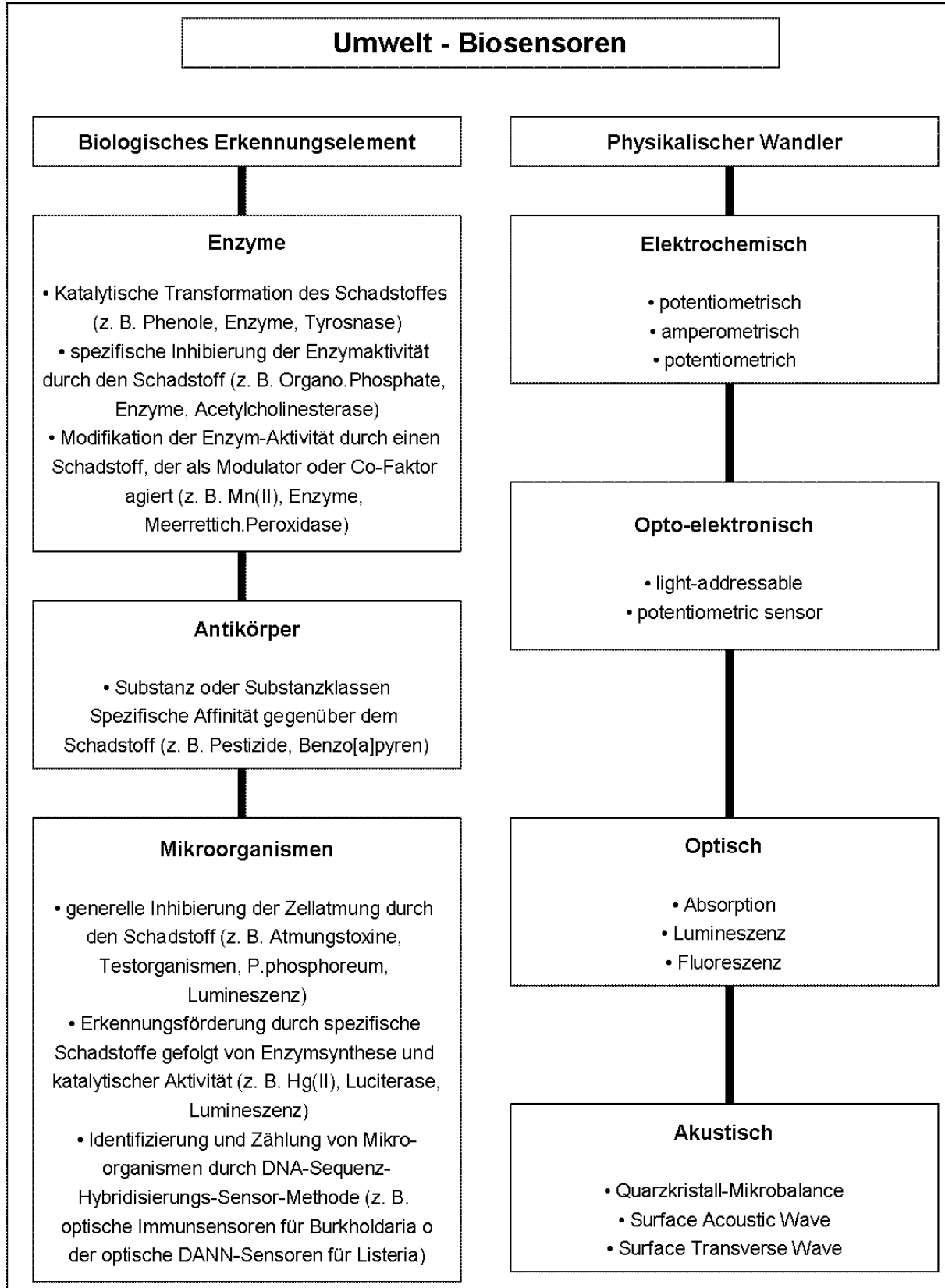


Abb. 1.7: Komponenten von Biosensoren nach /23/



READER
VERFAHRENS- UND ANLAGENTECHNIK

zusammengestellt von

Paul Engelke
Roland Matzmohr

Inhaltsverzeichnis

Leseanleitung Engelke

Leseanleitung Matzmohr

Reader „Umweltschutztechnik“ von ULRICH FÖRSTNER, 8. Auflage, 2008

Reader „Siedlungswasserwirtschaft“ von WILLI GUJER, 3. Auflage 2007

Glossar zum Teilgebiet „Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung“

Glossar zum Teilgebiet „Verfahren und Anlagen zur Luftreinhaltung und umweltschonenden Energiewandlung“

Beispielfragen

Weiterbildendes Fernstudium Master Umweltschutz

Modul 2: Naturwissenschaftliche und technische Grundlagen

Verfahrens- und Anlagentechnik

Für das Fach „**Verfahrens- und Anlagentechnik**“ sind zwei Dozenten verantwortlich:

Dr.-Ing. Roland Matzmohr
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik/Biotechnologie
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik (MSF)
Universität Rostock
Tel.: 0381/498-9435
Fax: 0381/498-9432
e-Mail: roland.matzmohr@uni-rostock.de

Dipl.-Ing. Paul Engelke
Lehrstuhl für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft
Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Universität Rostock
Tel.: 0381/498-3467
Fax: 0381/498-3462
e-Mail: paul.engelke@uni-rostock.de

Dabei ist das Fach in drei Teilgebiete untergliedert:

- 1) Verfahren und Anlagen zur umweltschonenden Energiewandlung (20%) [Matzmohr]
- 2) Verfahren und Anlagen zur Luftreinhaltung (20%) [Matzmohr]
- 3) Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung (60%) [Engelke]

Der Schwerpunkt der Lehreinheit „**Verfahrens- und Anlagentechnik**“ liegt mit 60% auf dem Teilfach 3: „**Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung**“. Das Fachwissen zur gesamten Lehreinheit soll anhand von Auszügen aus zwei Lehrbüchern erarbeitet werden; diese sind:

- „Umweltschutztechnik“ von ULRICH FÖRSTNER, 8. Auflage, 2008 und
- „Siedlungswasserwirtschaft“ von WILLI GUJER, 3. Auflage, 2007

Die Auszüge aus den beiden Lehrbüchern können auch in Form von PDF-Dokumenten zur Verfügung gestellt werden. Dabei enthalten die Auszüge nur die relevanten Kapitel und Abschnitte, die für die Wissensvermittlung zur Anfertigung der Einsendeaufgabe erforderlich sind. Die unwesentlichen Inhalte, auch innerhalb der Kapitel, sind rausgelöscht worden; daher ergeben sich auf den einzelnen Seiten z.T.

größere Lücken. Die Inhaltsverzeichnisse der beiden Lehrbücher sind komplett widergegeben; in diesen sind die in dem jeweiligen PDF-Dokument enthaltenen Kapitel farblich hinterlegt.

- **Grün** markiert sind die Kapitel, die **fakultativ zu lesen** sind; sie geben einen guten Einstieg in die Gesamtmaterie und stellen die Zusammenhänge der einzelnen Bereiche zueinander dar.
- **Blau** markiert sind die Kapitel zu den von **Dr.-Ing. Roland Matzmohr** betreuten Teilfächern „**Verfahren und Anlagen zur umweltschonenden Energiewandlung**“ und „**Verfahren und Anlagen zur Luftreinhaltung**“.
- **Orange** markiert sind die Kapitel zu den von **Dipl.-Ing. Paul Engelke** betreutem Teilfach „**Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung**“.

Die beigefügten Beispielfragen beziehen sich auf die blau und orange unterlegten Kapitel. Die Fragen ermöglichen dem Studenten eine Überprüfung des erlernten Wissens. Die Beantwortung der Fragen ist bei aufmerksamer Erarbeitung der Texte ohne weitere Informationsbeschaffung möglich. Die Inhalte der Fragen wiederholen sich bewusst, obwohl die Fragen überwiegend unterschiedlich formuliert sind. Dadurch wird die Sichtweise auf die Thematik erweitert, was die Erlangung eines komplexeren Verständnisses unterstützt. Ergeben sich bei der Fragenbeantwortung Probleme, sind diese in der Präsenzveranstaltung oder durch direkten Kontakt mit den Dozenten zu diskutieren. Die im Glossar enthaltenen Fachbegriffe sind lediglich eine lose Zusammenstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Teilfach „Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung“ [Engelke]

Der Schwerpunkt des Fachs „**Verfahrens- und Anlagentechnik**“ befasst sich mit den **Anlagen und Verfahren der Abwasserentsorgung**; der zuständige Dozent ist **Dipl.-Ing. Paul Engelke** von der Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Rostock.

Die Abwasserentsorgung ist Bestandteil der Siedlungswasserwirtschaft, die wiederum ein Teilgebiet der Wasserwirtschaft ist. Zur Siedlungswasserwirtschaft zählt als weiteres Betätigungsfeld die Wasserversorgung. Zusammengefasst umfasst die Siedlungswasserwirtschaft die Förderung, Aufbereitung und Verteilung von Trink- und Brauchwasser sowie die Ableitung und Behandlung des Abwassers einschließlich der Behandlung der Schlämme, die bei der Abwasserbehandlung anfallen. Aufgabe der Siedlungswasserwirtschaft ist es, die Auswirkungen von Gewässerbelastungen durch menschliche Wassernutzung – sowohl durch Entnahme als auch durch Einleitung – auf die aquatischen Systeme zu minimieren und gleichzeitig die Wasserversorgung zu sichern. Dafür ist es notwendig, die grundlegenden Vorgänge in Gewässern zu verstehen und zu wissen, in welcher Weise und durch welche Stoffe Gewässer geschädigt werden können. Gleichwohl ist das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft eine ingenieurtechnische Disziplin, die u.a. auch durch die Konstruktion und Ausführung unterschiedlichster Bauwerke – in Kanälen und auf Kläranlagen – geprägt ist. Daher erfolgt die Ausbildung in diesem Bereich klassischerweise innerhalb der Studiengänge des Bauingenieurwesens. Daneben hat sich die Lehre und Forschung zur Siedlungswasserwirtschaft mittlerweile in vielen, zum Großteil neu begründeten Studiengängen mit Umweltbezug etabliert.

Die Kapitel zu dem von Dipl.-Ing. Paul Engelke betreutem Teil „**Verfahren und Anlagen der Abwasserentsorgung**“ sind **orange** unterlegt. Die im Lehrbuch „Siedlungswasserwirtschaft“ von GUJER grün markierten, fakultativ zu lesenden Kapitel, geben einen guten Einstieg in die Materie und stellen die Zuordnung des Bereichs Siedlungswasserwirtschaft in den Gesamtkomplex „Umweltschutz – Umweltschutztechnik“ und benachbarte Gebiete dar.

In den ausgewählten orange markierten Lehrbuchkapiteln werden zunächst eine Beschreibung über Abwasser, seine Anfallarten und Inhaltsstoffe gegeben sowie die rechtlichen Grundlagen dargelegt. Es folgt ein Überblick über die gebräuchlichsten Formen der Abwasserableitung in Kanälen. Anschließend werden eingehend die mechanischen und biologischen Reinigungsverfahren von Kläranlagen beschrieben. Abschließend werden die Prozesse zur Klärschlammbehandlung erläutert.

In dem Wahl-Vertiefungsmodul „**Modul 3: Technischer und Integrativer Umweltschutz**“, im 3. Semester werden die Kenntnisse zur biologischen Abwasserreinigung weiter vertieft sowie das Fachgebiet Wasserversorgung mit Schwerpunkt auf der Trinkwasseraufbereitung vermittelt.

Teilfach „Verfahren und Anlagen zur Luftreinhaltung und umweltschonenden Energiewandlung“ [Dr.-Ing. Roland Matzmohr]

In diesem Teilfach wird die Problematik Schutz der „Ressource“ Luft durch den Einsatz von Verfahren und Anlagen insbesondere in den hierfür relevanten Bereichen der Energiewandlung näher beschrieben. Dabei geht es insbesondere um

- die Bereitstellung umweltschonender Energiewandlungssysteme und
- die Bereitstellung umweltfreundlicher "Energieverbraucher".

Umweltfreundlich bzw. umweltschonend bedeutet in diesem Zusammenhang:

- Verhinderung bzw. maximal mögliche Reduzierung umweltrelevanter Emissionen bei der Energiewandlung
- Nutzung Erneuerbarer Energien (Wind, Sonne, Nachwachsende Rohstoffe wie Biomasse, Biogas, Bioalkohol)
- Reduzierung des Einsatzes fossiler Brennstoffe zur Wärme- und Energieerzeugung durch
 - Verbesserung der Wirkungsgrade
 - Verringerung des Energiebedarfs in öffentlichen und privaten Bereichen bei Wärme- und Energieversorgung, Last- und Personentransport, Industrie und Gewerbe durch Erschließung von Einsparpotenzialen
- Reduzierung des Bedarfes an Rohstoffen bei der Herstellung von Investitions- und Gebrauchsgütern (Produktionsoptimierung, Verpackungsverringerung...)

Die Beantwortung der Fragen sollte sinnvoller Weise erst nach der Erarbeitung des Textes erfolgen. Es macht wenig Sinn, sich den Text nach den Fragen zu erarbeiten, da die Fragen nur einen kleinen Teil des Wissens abdecken können und ausschließlich der Überprüfung des Verständnisses dienen.

Der Unterrichtsstoff kann in 3 Lehreinheiten unterteilt werden:

Lerneinheit 1: ! **fakultativ** !

Ziele und Aufgaben der Umweltschutztechnik/Schadstoffe

Lerneinheit 2: Maschinen und Anlagen zur Luftreinhaltung

Lerneinheit 3: Maschinen und Anlagen zur umweltschonenden Energiewandlung

Ulrich Förstner

Umweltschutztechnik

7. vollständig bearbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Umweltschutztechnik	1
1.1	Entwicklung der Ziele und Aufgaben	1
1.1.1	Umweltprobleme und Umwelthandeln	4
1.1.2	Umsetzung des Leitbildes „Nachhaltigkeit“.....	7
1.1.3	Strategische Handlungsfelder – Perspektiven 2020.....	18
1.1.4	Umsetzung von globalen Klimaschutzzielen.....	22
1.2	Ökologische Grundlagen.....	32
1.2.1	Struktur von Ökosystemen	32
1.2.2	Stabilität von Ökosystemen und technischen Systemen.....	33
1.3	Technologische Grundlagen.....	36
1.3.1	Risikoforschung	38
1.3.2	Umweltinformatik	42
1.3.3	Prozessleittechnik	44
1.3.4	Verfahrenstechnik.....	46
1.3.5	Biotechnologie	50
1.3.6	Nanotechnologie	54
1.3.7	Ingenieurökologie	56
1.3.8	Technische Geochemie	57
1.3.9	Ingenieurgeologie und Geotechnik	58
1.3.10	Schutzmaßnahmen im Wasserbau	59
1.3.11	Energiesparende Bautechnik.....	60
1.3.12	Umweltschutztechnik als Querschnittsdisziplin	62
2	Umwelttechnik im Unternehmen	63
2.1	Rechtspolitische Aspekte des Umweltschutzes.....	63
2.1.1	Entwicklung des Umweltrechts in Deutschland	63
2.1.2	Maßnahmen zur Umsetzung von umweltpolitischen Zielen.....	65

2.2	Ökologische Ausrichtung der Betriebswirtschaft.....	69
2.2.1	Einsatz ökologieorientierter Managementsysteme	74
2.2.2	Integrierter betrieblicher Umweltschutz	76
2.3	Technik im betrieblichen Umweltschutz.....	79
2.3.1	Materialwirtschaft und Logistik	79
2.3.2	Umweltgerechtes Konstruieren	81
2.3.3	Produktion- und Fertigungstechnik	82
2.3.4	Verfahrensinterner Umweltschutz	84
2.4	Umweltschutzwirtschaft.....	87
2.4.1	Integrierte Produktpolitik	87
2.4.2	Industrielle Symbiose	90
2.4.3	Marktperspektiven für Umweltschutztechnologien.....	92
3	Schadstoffe	95
3.1	Gefahrstoffrecht, Schadwirkungen	95
3.1.1	Gefahrstoffrecht.....	98
3.1.2	Schadwirkungen	100
3.1.3	Umweltgefährliche Stoffeigenschaften.....	103
3.1.4	Umweltstandards	104
3.1.5	Zeitskalen der Schadstoffausbreitung	106
3.1.6	Parameter der Stoffdynamik in der Umwelt	107
3.2	Schwermetalle	109
3.2.1	Umwelttechnische Relevanz.....	109
3.2.2	Herkunft und Wirkung.....	110
3.3	Organische Schadstoffe	112
3.3.1	Umwelttechnische Relevanz.....	112
3.3.2	Herkunft und Wirkung.....	115
3.4	Strahlung.....	118
3.4.1	Natürliche Strahlenbelastung.....	119
3.4.2	Künstliche Strahlenbelastung	120
3.4.3	Elektrosmog.....	122
4	Klima und Energie	123
4.1	Grundlagen des Klimaschutzes	123
4.1.1	Wirkung und Herkunft der Treibhausgase.....	125
4.1.2	Übergang zu einem nachhaltigeren Energiesystem	126
4.2	Rationelle Energieerzeugung	132
4.2.1	Umwandlung von Energieformen.....	132
4.2.2	Entkarbonisierung.....	133
4.2.3	Kraft-Wärme-Kopplung	134
4.2.4	Einsatz von Brennstoffzellen.....	140
4.2.5	Erhöhung der Wirkungsgrade von Kraftwerken.....	142
4.2.6	CO ₂ -Sequestrierung – Carbon Capture Storage Technologies	148

4.3	Einsparpotenziale	150
4.3.1	Industrie und Gewerbe	150
4.3.2	Verkehr	151
4.3.3	Haushalte	154
4.3.4	Bilanz der Einsparpotenziale	157
4.3.5	Bedeutung von Innovationen im Energiebereich	158
4.4	Erneuerbare Energien	160
4.4.1	Nutzungsformen, Potenziale und Limitierungen	162
4.4.2	Geothermie	166
4.4.3	Solarthermische Wärmebereitstellung	167
4.4.4	Photovoltaik	168
4.4.5	Windenergie	170
4.4.6	Biomasse	172
4.4.7	Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien	180
4.4.8	Forschungsförderung zu Erneuerbaren Energien	182
5	Luft und Lärm	183
5.1	Ursachen und Wirkungen von Luftbelastungen	183
5.1.1	Luftschadstoffe in der Troposphäre	185
5.1.2	Entstehung von Stickoxiden	185
5.1.3	Entstehung von Schwefeldioxid	186
5.1.4	Ausbreitung von Luftschadstoffen	187
5.1.5	Wirkungen von Luftschadstoffen	189
5.2	Rechtsnormen und Ausbreitungsmodelle	192
5.2.1	Rechtsnormen	193
5.2.2	Feinstaub/Schwebstaub (PM)	196
5.2.3	Ausbreitungsmodelle	198
5.3	Luftreinhalte- und -reinigungstechniken	199
5.3.1	Staubemissionen	199
5.3.2	Verminderung gasförmiger Emissionen	203
5.3.3	Entschwefelung in Kraftwerken	206
5.3.4	Minderung von Stickoxiden	207
5.3.5	Kosten der Rauchgasreinigung in Kraftwerken	211
5.3.6	Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen	212
5.4	Verkehrslärm	216
6	Abwasser	219
6.1	Gewässergüte und Wasserbeschaffenheit	219
6.1.1	Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie	222
6.1.2	Klassifizierung der Gewässergüte und Wasserbeschaffenheit	223
6.2	Abwässer und ihre Bestandteile	224
6.2.1	Sammlung und Ableitung des Abwassers	224
6.2.2	Die kommunale Kläranlage	225
6.2.3	Schadstoffe im Abwasser	226
6.2.4	Gesetzliche Regelungen	228

6.3	Biologische Abwasserreinigung.....	230
6.3.1	Biologische Prinzipien und ihre technische Anwendung	230
6.3.2	Tropfkörperverfahren	233
6.3.3	Belebungsverfahren.....	234
6.3.4	Biologische Phosphor- und Stickstoff-Eliminierung.....	236
6.4	Chemisch-Physikalische Abwasserreinigung.....	238
6.4.1	Fällung von Schwermetallen	239
6.4.2	Flockung und fest-/flüssig-Trennung	242
6.4.3	Behandlung von Abwässern mit organischen Schadstoffen	245
6.5	Schlammbehandlung.....	247
6.5.1	Verfahrensstufen der Schlammbehandlung	248
6.5.2	Aerobe Schlammbehandlung – Hygienisierung	248
6.5.3	Anaerobe Abwasser- und Schlammbehandlung	249
6.5.4	Abtrennung des Schlammwassers	250
6.5.5	Schlamm Trocknung und Schlammverbrennung.....	251
6.5.6	Klärschlamm: Ressourcenschonung vs. Bodenschutz.....	254
6.6	Integrierte Wasserwirtschaft	255
6.6.1	Integration des Gesamtsystems Siedlungswasserwirtschaft.....	256
6.6.2	Integrierte dezentrale Abwasserentsorgungskonzepte	258
6.6.3	Flussgebietsmanagement am Beispiel von Sedimenten	260
7	Trinkwasser	263
7.1	Trinkwasserversorgung	263
7.1.1	Trinkwassernutzung und Einsparmöglichkeiten.....	266
7.1.2	Wasserbeschaffung	268
7.1.3	Werkstoffe in Leitungsnetzen.....	270
7.1.4	Trinkwasserverordnung	272
7.2	Einflüsse auf die Wasserqualität	275
7.2.1	Chemische Reaktionen im Untergrund.....	276
7.2.2	Biologische Vorgänge im Untergrund.....	278
7.3	Methoden der Trinkwasseraufbereitung.....	280
7.3.1	Künstliche Grundwasseranreicherung und Uferfiltration	282
7.3.2	Physikalisch-Chemische Behandlungsverfahren	284
7.3.3	Biologische Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung	289
7.3.4	Verfahrenskombinationen bei der Trinkwasseraufbereitung	289
7.4	Nutzung der Wasserressourcen in Deutschland	291

8	Boden und Altlasten	293
8.1	Art und Ausmaß von Stoffeinträgen in Böden	293
8.1.1	Anreicherungen von Schadstoffen in Böden und Pflanzen	294
8.1.2	Prozesse der Schadstofffreisetzung und -bindung in Böden	297
8.1.3	Perspektiven für landwirtschaftlich genutzte Böden	300
8.2	Altlastenprobleme	300
8.2.1	Sanierungsziele	302
8.2.2	Erkundung von Altablagerungen und Altstandorten	303
8.3	Sicherungsmaßnahmen	306
8.3.1	Ausgraben und Umlagern	306
8.3.2	Barrierensysteme	307
8.3.3	Verfestigung, Stabilisierung und Einbindung	309
8.4	Sanierung von Altlasten	311
8.4.1	Bodenluftabsaugung	311
8.4.2	Waschverfahren	312
8.4.3	Biologische Behandlung von Altlasten	314
8.4.4	Thermische Behandlung kontaminierter Böden	316
8.5	In-situ Methoden	318
8.5.1	Sickerwasserprognose	319
8.5.2	Natürlicher Abbau und Rückhalt	321
8.5.3	Reinigungswände	325
8.5.4	Flächenrecycling	326
9	Abfall	327
9.1	Abfallwirtschaftliche Grundlagen	327
9.1.1	Abfallwirtschaftliche Leitperspektiven	327
9.1.2	Grundsätze der Kreislaufwirtschaft	333
9.1.3	Abfallaufkommen in Deutschland	334
9.1.4	Eigenschaften des Restmülls	336
9.2	Sammlung und Aufbereitung von Abfällen	338
9.2.1	Sammelsysteme	338
9.2.2	Behandlung von Massenabfällen	338
9.2.3	Chemisch-physikalische Behandlung von Industrieabfällen	339
9.2.4	Behandlung halogenorganischer Abfälle	341
9.2.5	Kompostierung	342
9.3	Müllverbrennung	344
9.3.1	Müllverbrennungsanlagen	346
9.3.2	Rauchgasreinigung	348
9.3.3	Rückstandsbehandlung	349
9.3.4	Verwertung von Müllverbrennungsschlacken	352

9.4	Deponierung.....	354
9.4.1	Gesetzliche Regelungen für Deponien in Europa.....	354
9.4.2	Deponiegas und Sickerwasser	356
9.4.3	Barriersysteme in der Deponietechnik.....	360
9.4.4	Langzeitprognose für Deponien	362
10	Recycling.....	365
10.1	Theorie und Praxis des Recycling.....	365
10.1.1	Formen des Recycling	367
10.1.2	Bilanzierung von Stoff- und Energiekreisläufen	368
10.2	Recycling in den verschiedenen Wirtschaftssektoren	370
10.2.1	Verwertung im Bergbau und in der Grundstoff-Industrie	370
10.2.2	Urban Mining, Recycling von Baumaterialien	372
10.2.3	Recycling von Kunststoffen	376
10.2.4	Aufbereitung von Elektronikschrott	380
10.2.5	Altfahrzeug-Recycling	382
10.3	Integrierte Stoffwirtschaft	384
10.3.1	Entwicklung einer Integrierten Abfallbehandlung.....	386
10.3.2	Integrierter Ansatz für Recycling und Energieverbrauch.....	388
10.3.3	Vermeidung: Ansatzpunkte, Instrumente, Maßnahmen	392
Anhang	395
A.1	Energetische Umrechnungsfaktoren	395
A.2	Aufteilung des Energieverbrauches in Deutschland.....	395
A.3	Vergütungen nach dem Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG).....	396
A.4	Zentrale Handlungsempfehlungen zur Fortschreibung des EEG	396
A.5	Bioenergiepotenziale in Deutschland.....	398
Literaturverzeichnis	399
Literaturdatenbanken	460
Sachverzeichnis	461

1 Grundlagen der Umweltschutztechnik

Umweltschutztechnik verbindet die Herstellung und Verwendung von Nutzgegenständen mit dem Schutz natürlicher Ressourcen – das sind sowohl die materiellen Komponenten wie Wasser, Luft und Boden als auch ideelle Werte wie bspw. das Wohnumfeld. Ziel und Aufgabe in Forschung und Praxis sind die Vermeidung von unerwünschten Nebenwirkungen für die Umwelt bei Ingenieurlösungen.

Der ökologische Technikansatz ist dem *Vorsorgeprinzip* verpflichtet, der frühzeitigen Erfassung möglicher negativer Effekte. Er folgt dem *Leitbild der Nachhaltigkeit*, das den Einklang von wirtschaftlicher Entwicklung, sozialer Sicherheit und der langfristigen Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen anstrebt.

Abschnitt 1.1 befasst sich mit der Umsetzung dieses Leitbildes, u. a. bei den globalen Klimaschutzzielen; die Abschn. 1.2 und 1.3 beschreiben die ökologischen und technologischen Grundlagen der Querschnittsdisziplin Umweltschutztechnik mit Beispielen aus den einzelnen Schwerpunktbereichen. Themen in Abschn. 1.1 sind u. a.: traditionelle und moderne Umweltprobleme – Technikbilder und Umwelthandeln – Nachhaltigkeit in Wirtschaft (Gastbeitrag Holger Rogall, S. 8–12), Politik, Recht und Verwaltung – Bilanzen, Modelle, Indikatoren – strategische Handlungsfelder im Umweltschutz – Klimaschutz: Sicherheitsrisiken, Langzeitprognosen, Forschung und Gesetzgebung.

1.1 Entwicklung der Ziele und Aufgaben

Umweltschutztechnik umfasst in einem erweiterten Rahmen die Bestandsaufnahme und Bewertung einer Problemsituation, die Planung und Durchführung technischer Maßnahmen zur Problemlösung, sowie deren Überwachung und Nachsorge. Der Begriff „Umwelttechnik“ wird häufig für die zentralen Ingenieuraufgaben bei der Begrenzung und Reparatur von Umweltschäden benutzt. Die Entwicklung der Umweltschutz- bzw. Umwelttechnik weist bereits mehrere „Etappen“ auf:

1. Als in den 60er Jahren die negativen Begleitumstände einer rasch steigenden Industrieproduktion offensichtlich wurden, kam zunächst die „Nachbesserungs-Philosophie“ mit ihren sog. „End-of-the-pipe-Technologien“ zum Zuge. Bei der nach Branchen, Anlagen und Umweltmedien aufgesplitteten Planung und Anwendung von Techniken wurden jedoch Probleme häufig nur verlagert.
2. Diese Erfahrungen führten zu der Forderung, dass die industriellen Verfahren selbst unter Umwelts Gesichtspunkten optimiert werden sollten.
3. Je weiter die Belastungen aus dem Produktionsprozess verringert wurden, desto deutlicher wurde, dass die Produkte selbst bei ihrer Weiterverarbeitung, bei ihrem Gebrauch und schließlich mit ihrem Endverbleib zu einer Belastung natürlicher Systeme beitragen können.
4. Ausgelöst durch die Klimadiskussion orientieren sich technische Entwicklungen verstärkt an übergreifenden Zielen und Aufgaben: „Think globally, act locally“.

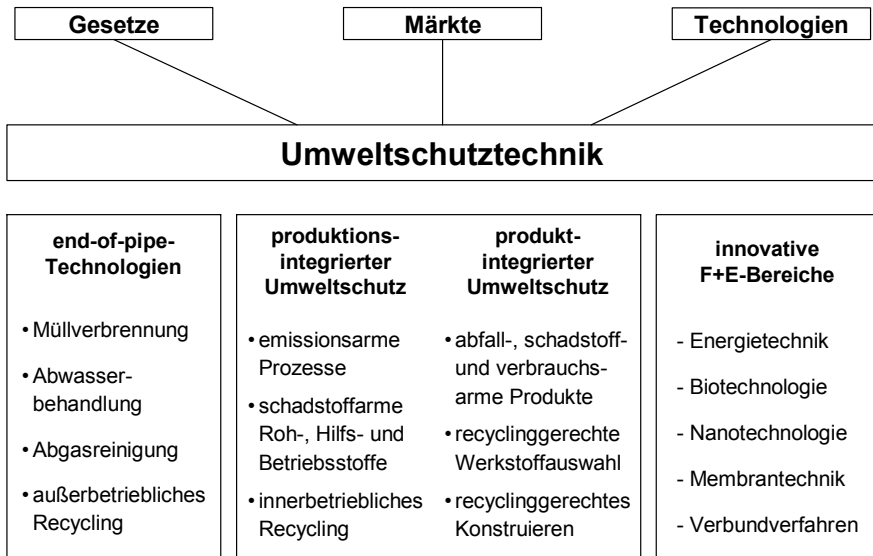


Abb. 1.1 Entwicklungsstadien der Umweltschutztechnik (nach Kaiser [1.1])

In Abb. 1.1 ist die Entwicklung von den nachbessernden zu den integrierten Umweltschutztechnologien im Überblick dargestellt:

- Für den Einsatz von Umwelttechnik sind neben dem technischen Entwicklungsstand die Marktsituation und die gesetzlichen Regelungen maßgebend (Kap. 2); letzteres gilt vor allem für die nachgeschaltete Reinigung von Abgas und Abwasser. *End-of-the-pipe*-Methoden können durchaus fortschrittlich sein, wie das Beispiel der Aktivkohlsfiltertechnik zeigt, deren hoher Wirkungsgrad den Einsatz von Müllverbrennungsanlagen in Stadtgebieten akzeptabel gemacht hat.
- Der *produktionsintegrierte Umweltschutz* zielt auf die Vermeidung und Verminderung von Abfällen innerhalb eines Produktionsprozesses, die Verwertung von Abfällen und Energien in anderen Bereichen des eigenen Betriebes und eine recyclinggerechte Auswahl von Materialien und Verfahren zur Vermeidung von nichtverwertbaren Produktionsabfällen.
- Der *produktintegrierte Umweltschutz* erweitert die verfahrensternen Maßnahmen auf den gesamten Lebensweg eines Produktes. Nachhaltigkeitsziele orientieren sich an der Einsparung von Energie und Materialien, an der Vermeidung von Schadstoffemissionen und an einem recyclingfreundlichen Produktdesign. Nach den klassischen Problemlösungen für gasförmig/flüssig/fest-Emissionen umfasst die zweite und dritte Generation von Umwelttechnologien die Nutzung von Produkten, inklusive deren Transport, Lagerung und Verteilung und am Ende die Ablagerung von Produkten und Nebenprodukten.

In allen drei Bereichen – nachbessernd, verfahrenstern und produktintegriert – werden die technischen Potenziale weiterentwickelt, auch unter Verwendung von *Innovationen* aus benachbarten Disziplinen (Abb. 1.1, rechte Säule).

Die zu lösenden Umweltprobleme befinden sich aus der Sicht der Forschung in ganz unterschiedlichen *Entwicklungsstadien*. Das erklärt auch die teilweise sehr beträchtliche Diskrepanz zwischen den öffentlichen Erwartungen oder gar Ansprüchen auf rasche Problemlösungen und den realistischen Möglichkeiten der Forschung und Praxis. Nach den Einteilungsprinzipien eines frühen niederländischen Umweltprogramms [1.2] werden in Tabelle 1.1 vier Phasen unterschieden, die mit typischen Vorgehensweisen in der Forschung und Praxis verbunden sind:

Ein Beispiel für die *Erkenntnisphase* ist der Treibhauseffekt, bei dem über eine Reihe potenzieller Ursachen, deren interne Vernetzungen und über das Ausmaß der regionalen Auswirkungen bislang weitgehende Unklarheit herrscht. Bei den Schadstoffen im Wasser besteht u. a. Unsicherheit über die Rolle von hormonaktiven Substanzen, die aus human- und tiermedizinischen Anwendungen eingetragen werden. In der *Erfassungsphase* befinden sich nach wie vor eine große Zahl von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, die – ebenso wie Nitrat – vor allem Probleme für die Trinkwasserversorgung darstellen. Komplexe Systeme mit vielschichtigen Wechselwirkungen sind bei den neuartigen Waldschäden („Waldsterben“) und bei der Versauerung von Böden zu erfassen. Ein typisches Beispiel für die *Handlungsphase* ist die biologische Sanierung von Altlasten, an dem sich aber auch zeigen lässt, dass die Forderung nach raschen Maßnahmen oft zu ökonomisch und technisch unbefriedigenden Ergebnissen führt, und man besser daran getan hätte, den Aufwand für wissenschaftliche Voruntersuchungen zu erhöhen. Überwiegend in der *Nachsorgephase* befinden die meisten Gewässer, die früher vor allem durch Bakterien und Viren für Menschen gefährlich waren. Gänzlich ohne Nachsorge soll die Deponierung von inertisiertem Restabfall in „Endlagerqualität“ auskommen und so die Reaktordeponie mit ihren langfristig unabsehbaren Auswirkungen („chemische Zeitbomben“) und Folgekosten ablösen.

Tabelle 1.1 Behandlung von Umweltproblemen durch Forschung und Praxis (nach [1.2])

<i>Erkennen</i>	<i>Erfassen</i>	<i>Handeln</i>	<i>Nachsorgen</i>
Entwicklungen deuten sich in Messungen an	Einzelfragen und mögliche Lösungen werden erforscht	Detailplanungen werden durch Praktiker umgesetzt	Problemlösungen werden langfristig überwacht
Treibhauseffekt	Waldsterben	Altlastensanierung	Gewässerschutz
Arzneimittelreste u. hormonaktive Stoffe	PSBM und Nitrat in Grundwässern	Phosphat in Binnen- u. Küstengewässern	Gefährdung durch Bakterien und Viren
Elektromagn. Feld: „Elektro-Smog“	Endlagerung von Nuklearabfällen	Zwischenlagerung von Nuklearabfällen	Anwendung von Röntgen-Strahlung
Verzögerte, nicht-lineare Wirkungen: Zeitbombeneffekte	Deponierung von Industriemüll, Klär- und Baggerschlämme	Müllentsorgung, konventionelle „Reaktordeponie“	Ablagerung von Inert-/Restabfall: „Endlagerqualität“
<i>Grundlagenforschung</i>	<i>angewandte Forschung</i>	<i>praxisbegleitende Forschung</i>	<i>Standardisierung und Normung</i>

Willi Gujer

Siedlungs- wasserwirtschaft

3., bearbeitete Auflage

Mit 217 Abbildungen und 84 Tabellen

 Springer

Inhalt

1	Einleitung.....	1
A	Grundlagen	
2	Systemanalyse und Massenbilanz.....	19
3	Charakterisierung von Wasser.....	33
4	Charakterisierung von Klärschlamm.....	65
5	Wasserbedarf, Abwasseranfall.....	69
6	Schmutzstoffanfall und Temperatur.....	95
B	Wasserversorgung	
7	Wasserversorgung.....	107
8	Wasserbeschaffung.....	115
9	Wasseraufbereitung.....	131
10	Wasserspeicherung.....	153
11	Wasserverteilung, Netz.....	161
C	Siedlungsentwässerung	
12	Siedlungsentwässerung.....	199
13	Siedlungshydrologie.....	205
14	Entwässerungsverfahren.....	227
15	Mischwasserbehandlung.....	235
16	Technik der Siedlungsentwässerung.....	245
17	Entwässerungsplanung.....	287
D	Abwasserreinigung	
18	Abwasserreinigung.....	291
19	Mechanische Abwasserreinigung.....	301
20	Biologische Abwasserreinigung.....	317
21	Physikalische Reinigungsverfahren.....	375
22	Umfeld und Kosten der Abwasserreinigung.....	381
23	Kleinkläranlagen.....	385
E	Behandlung von Klärschlamm	
24	Entsorgung von Klärschlamm.....	391
25	Verfahren der Schlammbehandlung.....	399
F	Literatur und Sachverzeichnis	
	Literatur.....	421
	Sachverzeichnis.....	427

1	Einleitung.....	1
1.1	Umschreibung des Fachgebiets.....	1
1.2	Siedlungswasserwirtschaft.....	1
1.3	Geschichte der Siedlungswasserwirtschaft.....	2
1.4	Wasserkreislauf in Siedlungen.....	5
1.5	Wasserbeschaffung und Wasserversorgung.....	7
1.6	Siedlungsentwässerung.....	10
1.7	Abwasserreinigung.....	11
1.8	Behandlung und Unterbringung von Klärschlamm.....	13
1.9	Gewässerschutz.....	15
1.10	Siedlungswasserwirtschaftliche Planung.....	16
1.11	Wert und Kosten der Siedlungswasserwirtschaft.....	16
1.12	Die Produkte der Siedlungswasserwirtschaft.....	17
1.13	Fazit.....	18
2	Systemanalyse und Massenbilanz.....	19
2.1	Einleitung.....	19
2.2	Systeme und deren Abgrenzung.....	19
2.3	Die Stoffbilanz.....	21
2.4	Ideale Reaktoren.....	23
2.4.1	Der Chargenreaktor.....	23
2.4.2	Der ideale Rührkessel.....	24
2.4.3	Der Röhrenreaktor.....	25
2.5	Anwendung der Bilanzgleichung.....	26
2.5.1	Speicherung.....	27
2.5.2	Speicherung und Transport.....	27
2.5.3	Keine Speicherung: Stationärer Zustand.....	28
2.5.4	Keine Umwandlung: Konservativer Stoff.....	29
3	Charakterisierung von Wasser.....	33
3.1	Vorbemerkungen.....	33
3.2	Summenparameter und Einzelstoffe.....	33
3.3	Filtration, gelöste und partikuläre Stoffe.....	34
3.3.1	Filtration.....	34
3.3.2	Abfiltrierbare Stoffe, TSS.....	34
3.3.3	Glühverlust der abfiltrierbaren Stoffe, VSS.....	35
3.3.4	Glührückstand der abfiltrierbaren Stoffe.....	36
3.4	Organische Stoffe.....	36
3.4.1	Chemischer Sauerstoffbedarf CSB.....	36
3.4.2	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen, BSB ₅	38
3.4.3	Organisch gebundener Kohlenstoff, TOC, DOC, POC.....	39
3.5	Stickstoff.....	40
3.5.1	Formen von Stickstoff.....	40
3.5.2	Ammonium und Ammoniak.....	41
3.5.3	Organisch gebundener Stickstoff, Kjeldahlstickstoff.....	42
3.5.4	Nitrit und Nitrat.....	43

3.5.5	Totaler Stickstoff, TN, gelöster Stickstoff, GN	43
3.5.6	Elementarer Stickstoff, N ₂	43
3.6	Phosphor, TP, GP, PO ₄ -P	44
3.7	pH-Wert und pH-Puffersystem	45
3.7.1	pH-Wert	45
3.7.2	pH-Puffer	46
3.7.3	Alkalinität, Säurebindungsvermögen, SBV	47
3.8	Wasserhärte	47
3.9	Gelöster Sauerstoff	50
3.10	Physikalische Analysen	51
3.10.1	Leitfähigkeit	51
3.10.2	Trübung	51
3.10.3	Temperatur	52
3.10.4	Dichte	53
3.10.5	Viskosität, Zähigkeit	53
3.10.6	Oberflächenspannung	53
3.10.7	Geruch und Geschmack	54
3.11	Mikrobiologische und hygienische Parameter	54
3.11.1	Escherichia coli	55
3.11.2	Beurteilung von Wasser	56
3.12	Grenzwerte und typische Analysen	58
3.12.1	Flusswasser, Seewasser, Grundwasser	58
3.12.2	Niederschlag und Regenwasser	59
3.12.3	Trinkwasserzusammensetzung	60
3.12.4	Städtisches und kommunales Abwasser	60
3.12.5	Abwasser bei Regenereignissen, Mischwasser	62
3.13	Probenahme	62
4	Charakterisierung von Klärschlamm	65
4.1	Trockensubstanz TS und Trockenrückstand TR	65
4.2	Glühverlust und Glührückstand	66
4.3	Zusammensetzung von Klärschlamm	67
5	Wasserbedarf, Abwasseranfall	69
5.1	Wasserbedarf und Abwasseranfall	69
5.2	Trinkwasserbedarf	71
5.2.1	Nomenklatur	71
5.2.2	Wasserverbrauch	72
5.2.3	Jahresgang des Wasserverbrauchs	75
5.2.4	Tagesgang des Wasserverbrauchs	76
5.2.5	Prognosen des Wasserbedarfs	78
5.2.6	Planungswerte für einzelne Versorgungsgebiete	81
5.3	Löschwasser	82
5.4	Abwasseranfall	83
5.4.1	Herkunft des Abwassers	83
5.4.2	Nomenklatur	84
5.4.3	Betriebserfahrungen	87

5.4.4	Dimensionierungswerte	90
5.5	Zukünftige Entwicklung und Planung.....	92
5.6	Zusammenfassung: Typische Wassermengen.....	93
6	Schmutzstoffanfall und Temperatur	95
6.1	Herkunft der Schmutzstoffe	95
6.2	Anforderungen an die Belastungsangaben	96
6.3	Einwohnergleichwerte (EG).....	96
6.4	Jahresgang der Belastung.....	99
6.5	Tagesgang der Belastung	100
6.6	Wochengang der Belastung.....	103
6.7	Abwassertemperatur.....	104
6.7.1	Jahresgang der Temperatur.....	104
6.7.2	Tagesgang der Temperatur	105
7	Wasserversorgung.....	107
7.1	Ziele der Wasserversorgung.....	107
7.2	Mittel der Wasserversorgung	108
7.2.1	Wasserbeschaffung.....	110
7.2.2	Schutzzonen.....	111
7.2.3	Wasseraufbereitung	111
7.2.4	Pumpwerke	111
7.2.5	Wasserspeicherung	111
7.2.6	Wasserverteilung	111
7.2.7	Hausinstallationen	112
7.2.8	Überwachung.....	112
7.2.9	Administration, Finanzplanung	113
7.2.10	Planung.....	113
8	Wasserbeschaffung	115
8.1	Wasserarten und -vorkommen	115
8.2	Fassung von Quellwasser.....	117
8.3	Fassung von Grundwasser	119
8.4	Berechnungen zum vollkommenen Filterbrunnen	121
8.5	Fassung von Seewasser	125
8.6	Grundwasseranreicherung.....	126
8.7	Schutz von Wasserfassungen (Schutzzonen)	127
9	Wasseraufbereitung	131
9.1	Desinfektion.....	132
9.2	Langsamsandfilter.....	135
9.3	Schnellfilter.....	136
9.4	Aktivkohleadsorption.....	139
9.5	Koagulation und Flockung.....	140
9.6	Sedimentation	141
9.7	Mikrosiebe	141
9.8	Vorfiltration	142

9.9	Abtrennung von partikulären Stoffen.....	143
9.10	Entfernung von Eisen und Mangan.....	144
9.11	Entsäuerung.....	144
9.12	Enthärtung.....	145
9.13	Mehrstufige Aufbereitung: Fallbeispiel Seewasser.....	146
9.14	Aufbereitung von Flusswasser	149
9.15	Membrantechnologie	149
10	Wasserspeicherung	153
10.1	Aufgabe der Wasserspeicher (Reservoir)	153
10.2	Art der Wasserspeicher	153
10.2.1	Hochbehälter.....	153
10.2.2	Tiefbehälter.....	154
10.3	Standort und Höhenlage.....	154
10.4	Speichervolumen.....	154
10.4.1	Löschreserve.....	156
10.5	Bilanzierung eines Trinkwasserspeichers	156
10.6	Hygienische Anforderungen	157
10.7	Gestaltung eines Trinkwasserspeichers.....	157
10.8	Spezialfälle.....	158
10.8.1	Wasserturm.....	158
10.8.2	Löschwasserbehälter.....	159
10.8.3	Druckwindkessel	159
11	Wasserverteilung, Netz.....	161
11.1	Stationäre Rohrhydraulik	161
11.1.1	Grundlagen der Rohrhydraulik	162
11.1.2	Äquivalente Rohrleitungen.....	168
11.1.3	Typische Fließgeschwindigkeiten	170
11.2	Pumpen	170
11.2.1	Dimensionierung von Kreiselpumpen	170
11.2.2	Bedarf an Förderhöhe	171
11.2.3	Charakterisierung der Pumpenleistung.....	173
11.2.4	Betriebspunkt einer Kreiselpumpenanlage	176
11.2.5	Serie- und Parallelbetrieb von Pumpen	176
11.2.6	Anordnung von Pumpen.....	177
11.3	Wasserverteilung: Netzberechnungen.....	178
11.3.1	Elemente eines Verteilnetzes	178
11.3.2	Einfache Netzberechnungen	180
11.3.3	Elektronische Netzberechnung	183
11.4	Gestaltung von Verteilnetzen	184
11.4.1	Druckhaltung	186
11.4.2	Druckzonen.....	186
11.5	Hydraulische Lastfälle – Ziele der Bemessung.....	188
11.6	Sonderbauwerke.....	189
11.6.1	Druckreduzierventile	189
11.6.2	Druckbrecherschacht	189

11.6.3	Zonenpumpwerke	189
11.7	Instationäre Vorgänge: Der Druckstoss	190
11.7.1	Druckstoss nach Joukowsky	190
11.7.2	Massnahmen gegen Druckstösse	193
11.7.3	Der hydraulische Widder	195
11.8	Mess-, Steuer-, Regel- und Fernwirktechnik	196
11.9	Planung der Wasserversorgung	196
11.9.1	Planungshorizont	197
11.10	Kosten der Wasserversorgung	197
12	Siedlungsentwässerung	199
12.1	Aufgaben der Siedlungsentwässerung	199
12.2	Prozesse der Siedlungsentwässerung	200
12.3	Wie sollen Siedlungen entwässert werden?	201
12.4	Elemente der Siedlungsentwässerung	203
13	Siedlungshydrologie	205
13.1	Einführung in die Siedlungshydrologie	205
13.2	Charakterisierung von Regen	208
13.3	Intensität von Starkregen	210
13.4	Abflussbeiwert von Siedlungsgebieten	217
13.5	Maximaler Regenabfluss	219
13.5.1	Jährlichkeit des Regenereignisses	220
13.5.2	Reduzierte Fläche	221
13.5.3	Massgebende Regenintensität	221
13.5.4	Fliesszeitverfahren	222
14	Entwässerungsverfahren	227
14.1	Historische Entwicklung	227
14.2	Grundlagen	227
14.3	Mischsystem	228
14.4	Trennsystem	229
14.5	Qualifiziertes Trennsystem	231
14.6	Reale Systeme	232
14.7	Alternative Systeme	232
14.8	Flankierende Massnahmen	232
15	Mischwasserbehandlung	235
15.1	Problemstellung	235
15.2	Konzept der Mischwasserbehandlung	236
15.3	Auswirkungen der Mischwasserbehandlung	240
15.3.1	Fallbeispiel Regenüberlaufbecken	241
15.3.2	Fallbeispiel Vorklärung	242
15.3.3	Fallbeispiel Ammonium	243
16	Technik der Siedlungsentwässerung	245
16.1	Technische Elemente der Siedlungsentwässerung	245

16.1.1	Liegenschafts- und Strassenentwässerung.....	245
16.1.2	Retention und Drosselung	248
16.1.3	Kanalisationen	248
16.1.4	Kontrollschächte.....	253
16.1.5	Kanalvereinigungen.....	254
16.1.6	Profilwechsel.....	254
16.1.7	Absturzbauwerke.....	255
16.1.8	Düker.....	256
16.1.9	Entlastungsbauwerke.....	256
16.1.10	Drosselstrecken.....	259
16.1.11	Regenbecken.....	259
16.1.12	Siebe und Rechen	267
16.1.13	Abwasserpumpwerke.....	267
16.1.14	Drosselorgane.....	268
16.1.15	Einleitbauwerke.....	268
16.1.16	Versickerungsanlagen.....	269
16.1.17	Sanierungsleitungen	273
16.2	Hydraulische Berechnungen	274
16.2.1	Grundsätze / Lastfälle.....	274
16.2.2	Freispiegelleitungen	275
16.2.3	Steilleitungen.....	280
16.2.4	Gefällswechsel.....	281
16.3	Modelle der Siedlungsentwässerung.....	282
16.4	Entwurf von Kanalnetzen.....	285
16.5	Abflusssteuerung im Entwässerungsnetz	285
16.6	Messtechnik	286
16.7	Betrieb der Siedlungsentwässerung	286
17	Entwässerungsplanung.....	287
17.1	Generelles Kanalisationsprojekt (GKP).....	287
17.2	Genereller Entwässerungsplan (GEP).....	288
17.3	Rollenteilung zwischen Politik und Ingenieur	289
18	Abwasserreinigung.....	291
18.1	Aufgaben der Abwasserreinigung	291
18.2	Einleitbedingungen von Kläranlagen	292
18.3	Fliessschema einer Kläranlage.....	296
19	Mechanische Abwasserreinigung.....	301
19.1	Mechanische Vorreinigung	301
19.1.1	Rechen.....	301
19.1.2	Sand- und Fettfang	302
19.2	Dimensionierungsmodell für die Sedimentation.....	305
19.3	Vorklärung	308
19.3.1	Aufgabe und Leistung der Vorklärung	308
19.3.2	Gestaltung und Dimensionierung des Vorklärbeckens.....	310
19.3.3	Emscherbrunnen.....	312

19.4	Chemische Abwasserreinigung.....	313
20	Biologische Abwasserreinigung	317
20.1	Ziel der biologischen Abwasserreinigung.....	317
20.2	Mikrobiologische Prozesse	318
20.2.1	Wachstum.....	318
20.2.2	Zerfall.....	320
20.2.3	Hydrolyse	320
20.2.4	Abbau organischer Stoffe, heterotrophe Organismen.....	321
20.2.5	Nitrifikation.....	321
20.2.6	Denitrifikation	321
20.2.7	Nährstoffbedarf der Mikroorganismen	321
20.3	Unterschiedliche biologische Verfahren	322
20.4	Belebtschlammverfahren	323
20.4.1	Fliessschema des Belebtschlammverfahrens.....	323
20.4.2	Charakterisierung von Belebtschlamm.....	325
20.4.3	Dimensionierung des Belebtschlammverfahrens.....	328
20.4.4	Dynamische Simulation von Belebungsanlagen.....	333
20.4.5	Gestaltung des Belebungsbeckens, Sauerstoffverbrauch.....	333
20.4.6	Gestaltung des Nachklärbeckens	336
20.4.7	Elimination von organischen Stoffen	338
20.4.8	Nitrifikation.....	342
20.4.9	Denitrifikation	349
20.4.10	Chemische Phosphorelimination	354
20.4.11	Biologische Phosphorelimination	359
20.4.12	Biologische Nährstoffelimination: Zusammenfassung.....	362
20.5	Tropfkörperverfahren.....	363
20.5.1	Bemessung von Tropfkörpern	364
20.5.2	Phosphorelimination in Tropfkörperverfahren	368
20.5.3	Nachklärung	368
20.6	Tauchkörperverfahren	369
20.7	Neuere biologische Verfahren.....	371
20.7.1	Biofiltration	371
20.7.2	Membran Bioreaktoren (MBR)	372
21	Physikalische Reinigungsverfahren.....	375
21.1	Filtration.....	375
21.1.1	Raumfiltration.....	375
21.1.2	Flächenfiltration	378
21.2	Flotation mit gelöster Luft	378
22	Umfeld und Kosten der Abwasserreinigung.....	381
22.1	Projektbearbeitung	381
22.2	Kosten der Abwasserreinigung	383
23	Kleinkläranlagen und alternative Konzepte.....	385
23.1	Anaerobe Reinigungsverfahren.....	385

23.2	Verfahren mit Bodenpassage	386
23.3	Abwasserteiche	387
23.4	Pflanzenanlagen	387
23.5	Varianten der konventionellen Verfahren	388
23.6	Speicher, Trockenklosetts, etc.....	388
23.7	Wahl des Verfahrens	388
23.8	Entsorgung des anfallenden Schlammes.....	389
23.9	Dezentrale Entsorgungskonzepte	389
24	Entsorgung von Klärschlamm	391
24.1	Ziel und Aufgabe der Schlammbehandlung	391
24.2	Nutzung und Endlagerung	394
24.3	Verfahrensablauf und Stoffströme	395
24.4	Klärschlammkonzepte.....	396
24.5	Zukunft der Klärschlamm Entsorgung.....	397
25	Verfahren der Schlammbehandlung	399
25.1	Eindickung	399
25.2	Hygienisierung	401
25.2.1	Aerob thermophile Hygienisierung	402
25.2.2	Thermische Hygienisierung / Pasteurisierung	404
25.3	Biologische Schlammstabilisierung	405
25.3.1	Anaerob mesophile Schlammstabilisierung / Faulung	405
25.3.2	Langzeitbelüftung.....	410
25.3.3	Aerobe mesophile Schlammstabilisierung.....	411
25.4	Stapelung	412
25.5	Entwässerung	413
25.5.1	Konditionierung.....	413
25.5.2	Dekanter	413
25.5.3	Filterpressen	413
25.5.4	Bandfilterpressen.....	415
25.5.5	Trockenbeete	415
25.6	Trocknung	417
25.7	Verbrennung	418
	Literatur.....	421
	Sachverzeichnis.....	427

1 Einleitung

Die Siedlungswasserwirtschaft ist eine technische Disziplin, die sowohl für die persönliche und die Siedlungs-Hygiene als auch den Komfort und die Sicherheit des urbanen Menschen von zentraler Bedeutung ist: Sie liefert und entsorgt Wasser verschiedenster Art (Trinkwasser, Regenwasser, Sickerwasser, Schmelzwasser, verunreinigtes Abwasser, etc.), sie entsorgt die dabei anfallenden Schmutzstoffe und bewirtschaftet die natürlichen Wasserressourcen (Quellen, Grundwasser, Gewässer) im Umfeld von Siedlungen.

1.1 Umschreibung des Fachgebiets

Die Siedlungswasserwirtschaft befasst sich mit dem Umsatz von Wasser im Umfeld von Siedlungen. Dabei interessiert nicht nur das Wasser an sich, sondern genauso die darin enthaltenen Stoffe und Organismen und die Prozesse, die auf diese Stoffe einwirken.

Als Wirtschaftszweig stellt die Siedlungswasserwirtschaft strukturelle, organisatorische und technische Infrastrukturen bereit. Diese sind erforderlich, um das Wasser in den Siedlungen zu bewirtschaften und zu entsorgen; das heisst für den Menschen zu nutzen ohne langfristig die Grundlagen dieser Nutzung zu gefährden.

Als technische Disziplin wurde die Siedlungswasserwirtschaft historisch als eine Reihe von Einzeldisziplinen dargestellt: Wasserversorgung, Siedlungsentwässerung, Abwassertechnik etc. Heute wird versucht, die Siedlungswasserwirtschaft als integrierende Disziplin darzustellen, die die Wasserressourcen, die Nutzung des Wassers in Siedlungen und den erforderlichen Abtransport des Abwassers mit seinen z.T. problematischen Inhaltsstoffen als Ganzes darstellt und insbesondere die Vernetzung zwischen den Teildisziplinen und Teilsystemen berücksichtigt.

1.2 Siedlungswasserwirtschaft

Die Siedlungswasserwirtschaft ist eine Ingenieurwissenschaft, die sich mit allen Aspekten des Wassers im Zusammenhang mit Siedlungen befasst:

- der gesicherten Beschaffung, der Aufbereitung und Verteilung von Trink- und Brauchwasser in genügender Menge, Qualität und bei genügendem Druck,
- der Ableitung und Reinigung des Abwassers sowie der möglichst schadlosen Rückführung des gereinigten Abwassers in die Natur,

- der Sammlung, Versickerung und Ableitung von Regen-, Schneeschmelz-, Drainage- und anderen wenig belasteten Wässern,
- dem Bau, Betrieb und Unterhalt der erforderlichen Anlagen, der Organisation der Betriebsstrukturen, der Sicherstellung der ökonomischen Grundlagen etc.,
- der Planung der Wasserversorgung und Wasserbeschaffung, der Entwässerung und des regionalen Gewässerschutzes,
- der langfristigen Sicherung der Wasserressourcen sowie der finanziellen Sicherstellung der Wasserversorgung und der Siedlungsentwässerung und der nachhaltigen Entwicklung des Wasserhaushalts von Siedlungen.

Insgesamt ergibt sich das Bild, dass die Siedlungswasserwirtschaft sowohl *dem Menschen dient*, indem sie im Bereich der Siedlungshygiene (Wasserversorgung und Abwasserableitung) und dem Hochwasserschutz (Ableitung von Regenwasser) seit vielen Jahrzehnten Entscheidendes geleistet hat, als auch *die Natur schützt*, indem sie im Bereich des Gewässerschutzes grosse Investitionen auslöst. Ohne Siedlungswasserwirtschaft wären Siedlungen und insbesondere Städte (also unsere Art der Zivilisation) in ihrer heutigen Form auch nicht angenähert denkbar und viele Gewässer wären in katastrophalem Zustand.

Die Siedlungswasserwirtschaft und der Siedlungswasserbau tragen zu einem Interessenausgleich bei und schützen dabei

1. *den Menschen vor der Natur (Hochwasser, Hygiene, Trockenheit) und*
 2. *die Natur vor dem Menschen (Gewässerschutz)*
-

1.3 Geschichte der Siedlungswasserwirtschaft

Ein Verständnis für die Geschichte der Siedlungswasserwirtschaft hilft zu verstehen, wieso sich die heute genutzte Technologie als eine unter vielen möglichen durchgesetzt hat.

Die Geschichte der Siedlungswasserwirtschaft ist eng verbunden mit der Entwicklung der grossen Siedlungen und der Städte. Erste Wasserversorgungen und insbesondere Stadtentwässerungsanlagen sind in Indien bereits vor mehr als 6500 Jahren nach erstaunlich modernem Konzept gebaut worden: Bäder, eigentliche Küchen, Tonröhren, Hauskläranlagen, Sammelleitungen. Erste Spülaborte wurden in Kreta vor ca. 3000 Jahren gebaut. Die Ägypter kannten Druckrohrleitungen aus Blei. Sie verwerteten Fäkalien gezielt als Dünger.

Die griechische und die römische Kultur hatten einen hohen sanitären Standard erreicht, z.B. war das Kolosseum in Rom mit seinen 80'000 Sitzplätzen mit mehreren Abortanlagen zu jeweils 25 Sitzplätzen ausgerüstet. Die Cloaca maxima, der Hauptsammelkanal für die Ableitung von Regenwasser und verschmutztem Abwasser, Fäkalien, Kehrlicht etc. im alten Rom ist ein grosses Bauwerk mit bis zu 4 Metern Höhe (das bis vor wenigen Jahren immer noch genutzt wurde).

Im Mittelalter ging das alte Wissen z.T. verloren. Die Strassen in mittelalterlichen Städten waren oft verschlammte von faulenden Fäkalien und Kehrlicht. Stadtmist war ein begehrter Dünger, der Häufig nur innerhalb der Stadtmauern genutzt werden durfte. Eine regelmässige Säuberung der Städte wurde kaum betrieben. Es herrschten unhygienische Verhältnisse und entsprechend häufig bra-

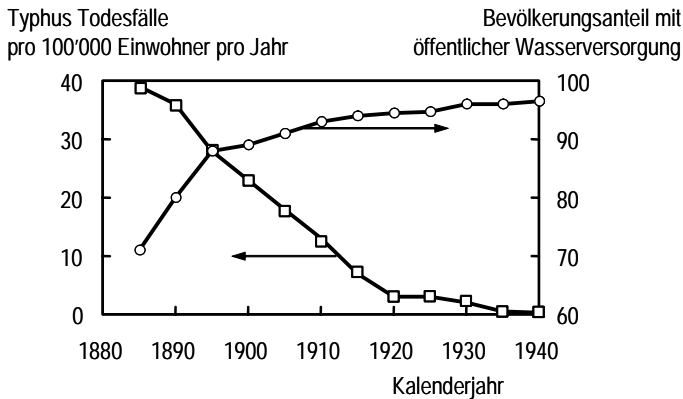


Abb. 1.1. Abnahme der Typhus Todesfälle anfangs des 20. Jh. in Massachusetts (USA) als Folge des zunehmenden Anteils der Bevölkerung mit öffentlicher Wasserversorgung (nach Whipple and Horwood, 1966)

chen Seuchen aus: Pest, Typhus, Cholera. Diese Seuchen begrenzten in den Städten immer wieder das Wachstum der Bevölkerung. Mit der Industrialisierung im 19. Jh. nahm die Bevölkerungsdichte und damit die Belastung der Umwelt und des Grundwassers in den Städten zu. Grosse Typhus und Cholera Epidemien, die v.a. durch verseuchtes Trinkwasser ausgelöst werden, waren die Konsequenz.

Im gleichen Jh. wurde der Zusammenhang zwischen Hygiene und Sterblichkeit aufgedeckt. Nach und nach wurde die Schwemmkanalisation eingeführt, in der Abfälle und Schmutzstoffe mit Wasser abgeschwemmt werden, und durch unterirdische Anlagen wurde das Abwasser auf schnellstem Wege in den nächsten Fluss geleitet.

Beispiel 1.1: Schweinefurter Stadtverordnung von 1720

In der Schweinefurter Stadtverordnung aus dem Jahre 1720 steht, dass es nicht erlaubt ist, den wertvollen Dung nach ausserhalb der Stadtgrenzen zu bringen. Es war sogar bei zwei Gulden Strafe verboten, den Kuhmist auf den städtischen Weiden aufzulesen. Wörtlich hiess es: „Unter welcher Bedrohung auch das Auflesen des Kuh-Mists auf denen gemeinen Vieh-Rasen untersagt ist, und sollte niemand unter denen Thoren passiert, sondern solches abgenommen und der Frevel angezeigt werden.“

Mit der Einführung der Schwemmkanalisation und insbesondere des Wasser-klosetts im 19. Jh. wurden die hygienischen und ästhetischen Probleme von den Städten in die Gewässer verschoben. Mit der Aufdeckung des Zusammenhanges zwischen der fäkalen Verunreinigung von Trinkwasser und der Häufigkeit von stark verbreiteten Krankheiten bekam die Aufbereitung von Trinkwasser eine immer grössere Bedeutung. Eine zuverlässige Trinkwasseraufbereitung konnte aber nur in öffentlichen, grossen Wasserversorgungsbetrieben gewährleistet werden (Abb. 1.1). Diese Entwicklung trug massgebend dazu bei, dass jetzt die Städte schnell wachsen konnten und so das Potential für die industrielle Entwicklung geschaffen wurde.

Der Gewässerschutz hat in England gegen Ende des 19. Jh. eingesetzt. Damals sammelten sich z.B. auf der Sohle der Themse Sedimente und verfaulten dort, so dass der Fluss als Folge der Biogasbildung „gekocht“ habe. Erste Abwasserreinigungsanlagen wurden als Sedimentationsanlagen gebaut, um die Akkumulation der Sedimente in den Gewässern zu verringern und sie in technischen Bauwerken abzutrennen. Schon bald zeigte sich aber, dass neben den Sedimenten insbesondere die gelösten und kolloidalen organischen Stoffe, die biologisch abbaubar sind, in den Gewässern eine massenhafte Entwicklung von Mikroorganismen auslösten. Zunehmend wurden biologische Abwasserreinigungsverfahren entwickelt, die den Abbau dieser organischen Stoffe in die technischen Bauwerke zurückverlegten und so die Gewässer entlasteten: Bereits gegen Ende des 19. Jh. wurden erste biologische Kläranlagen in England gebaut.

In der Mitte des 20. Jh. haben wir erkannt, dass die Nährstoffe im Abwasser, insbesondere der Phosphor, die Seen überdüngen und zu grossen Algenblüten führen. Mit Hilfe der weitergehenden Abwasserreinigung konnte auch dieses Problem angegangen werden. Heute verursachen v.a. die Massnahmen zur Reduktion des Stickstoffgehalts im gereinigten Abwasser grosse Investitionen und bereits wird nach Möglichkeiten gesucht um das nächste Problem zu lösen: Mikroverunreinigungen und Spurenstoffe sollen aus dem Abwasser eliminiert werden.

Beispiel 1.2. Typhus Risiko

Wie gross war 1885 das Risiko in den USA an Typhus zu sterben?

Nach Abb. 1.1 starben in Massachusetts 1885 jedes Jahr pro 100'000 Menschen 40 Menschen an Typhus. Übertragen auf heute, mit einer mittleren Lebenserwartung von 75 Jahren, ergibt das ein Sterberisiko von $75 \text{ a} \cdot 40 \text{ a}^{-1} / 100'000 = 3\%$. Typhus ist nur eine von vielen Krankheiten, die mit dem Wasser übertragen werden.

Das Risiko im Strassenverkehr zu sterben beträgt heute in den Industrieländern ca. 0.5 %. Das Risiko an verseuchtem Trinkwasser zu sterben ist heute verschwindend gering.

Beispiel 1.3. Cholera in Hamburg, ein Originaltext

Bekanntmachung.

Vor dem Genuß ungekochter Speisen, namentlich ungekochten Elb- und Leitungswassers sowie ungekochter Milch, wird dringend gewarnt.

Hamburg, den 1. September 1892. Die Cholera-Commission des Senats.

Die Choleraepidemie hat 1892 in Hamburg über 10'000 Tote gefordert!

Beispiel 1.4. Cholera in Lateinamerika. Neue Zürcher Zeitung, 3. März 1993

Die Choleraepidemie erreicht Rio

... Die Epidemie hat sozialen Charakter. ... Rund 60% der neun Millionen Einwohner steht kein sauberes Trinkwasser und stehen keine sanitären Einrichtungen zur Verfügung. Cholera wird durch verseuchtes Wasser übertragen. ... Die neue Choleraepidemie in Lateinamerika ging im Januar 1991 von der Küste Perus aus ...

Beispiel 1.5. Cholera ist als Reisekrankheit heute unbedeutend

Die Choleraerreger werden über Trinkwasser und verunreinigte Lebensmittel, vor allem über Gemüse, Fisch und Meeresfrüchte übertragen. Vor allem unterernährte, körperlich geschwächte und bereits erkrankte Menschen, die in Regionen mit mangelnder medizinischer Betreuung leben, sind heute von der Cholera betroffen. Das Infektionsrisiko von Reisenden ist hingegen sehr gering, in Deutschland wurden in den Jahren 2001 – 2003 insgesamt 3 zugereiste Fälle bekannt.

1.4 Wasserkreislauf in Siedlungen

Der Gesamtniederschlag über der Schweiz beträgt ca. 1500 mm pro Jahr, davon fließen ca. 1000 mm ab. Nur gerade 30 mm werden als Trink- und Brauchwasser genutzt, zusätzlich müssen ca. 40 mm als Drainage und Regenwasser aus den Siedlungen abgeleitet werden. Am gesamten Wasserkreislauf der Schweiz ist also die Siedlungswasserwirtschaft nur mit wenigen Prozenten beteiligt. Lokal können diese Zahlen aber ganz unterschiedlich sein (s. Abb. 1.2 und Beispiel 1.7). In Siedlungen beherrscht die Siedlungswasserwirtschaft den Wasserumsatz dominant. Heute können die Siedlungen ihren Wasserbedarf nicht mehr mit lokalen Quellen decken, sie müssen Wasser aus der Umgebung importieren (Abb. 1.2).

Die Urbanisierung oder die zunehmende Besiedlungsdichte hat einen entscheidenden Einfluss auf die verschiedensten Prozesse im Wasserkreislauf (Abb. 1.3). Insbesondere die zunehmende Versiegelung der Landschaft und die Anpassungen der oberflächlichen Entwässerungssysteme (die Drainage der Feuchtgebiete und die Begradigung und Beschleunigung der Fliessgewässer) verändern den Wasserhaushalt von Siedlungen stark. Die Entwicklung, die im Verlaufe der letzten 100 Jahre stattgefunden hat, hat die Landschaft in einem Ausmass und mit einer Geschwindigkeit verändert, wie das wohl kaum je zuvor und möglicherweise auch in Zukunft nie wieder möglich sein wird (Abb. 1.4).

Typische Elemente des Wasserkreislaufs in Siedlungen sind in Abb. 1.5 dargestellt. See-, Grund- und Quellwasser dienen der Wasserversorgung. Das Wasser wird aus Reservoirs (Speichern) unter Druck in die Siedlungen geliefert, dort mit Schmutzstoffen belastet und in die Kanalisation zurückgeleitet. Die Kanalisation nimmt bei Regen auch das Regenwasser auf. Bei starken Regen reicht die Transportkapazität der Kanalisation aber nicht mehr aus, über Entlastungen muss ca. 5 mal pro Jahr Wasser direkt, ungereinigt in die Vorflut entlastet werden (nicht eingezeichnet). Die Kapazität der Kläranlagen genügt auch bei schwächeren Regen nicht, um all das anfallende Wasser zu reinigen. Vor den Kläranlagen muss bei Regen daher noch einmal Mischwasser entlastet werden (bis 50 Mal pro Jahr). Dieses Wasser wird meistens einer einfachen Reinigung unterzogen (Regenbecken). Erst nach der Kläranlage wird das dauernd anfallende Abwasser in die Vorflut eingeleitet.

Beispiel 1.6: Bedeutung des Worts Vorflut

Als *Vorflut* oder *Vorfluter* bezeichnet man das Gewässer, in das Abwasser eingeleitet wird, das anschliessend mit natürlichem Gefälle abfliessen kann und daher ohne weitere Förderung auskommt.

Glossar

DWA

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) - (ehemaliges Kürzel „ATV-DVWK“, ehemals Abwassertechnische Vereinigung (ATV)) - versteht sich in Deutschland als Sprecherin für alle übergreifende Wasserfragen und setzt sich nach eigenen Angaben intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasserwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz. Der Schwerpunkt ihrer Tätigkeiten liegt auf der Erarbeitung und Aktualisierung eines einheitlichen **technischen Regelwerkes (ATV-A und ATV-M)** sowie der Mitarbeit bei der Aufstellung fachspezifischer Normen auf nationaler und internationaler Ebene.

Eutrophierung

Unter Trophie wird das Nährstoffangebot in einem Ökosystem, z.B. Gewässer, verstanden. Sind nur wenige Nährstoffe vorhanden (oligotroph), werden diese ohne erkennbare Auswirkung durch biologische und chemische Prozesse entfernt. Bei hoher organischer Belastung (eutroph) wird für deren aeroben Abbau derart viel Sauerstoff aus dem Wasser entfernt, dass anaerobe Verhältnisse entstehen. Das Gewässer ist durch Eutrophierung „umgekippt“.

Gewässergüte

Qualität von Oberflächengewässern. Die Festlegung der Gewässergüte erfolgt anhand von Parametern, die den Gewässerzustand abbilden und eine Bewertung ermöglichen. Eine von kurzfristigen Einflüssen unabhängige Zustandsbeschreibung bietet die Einteilung nach dem sogenannten Saprobien-system. Je nach Belastung mit organischen, unter Sauerstoffzehrung biologisch abbaubaren Inhaltsstoffen werden dabei anhand des biologischen Besiedlungsbildes für Fließgewässer 4 Güteklassen und 3

Zwischenstufen unterschieden.

End-of-pipe

Die Behandlung von „Abströmen“ vorwiegend aus großtechnischen Produktionsprozessen i.d.R. nach Zusammenführung aller Emissionsquellen, wird als End-of-pipe verstanden. Im Gegensatz dazu sind integrative Entsorgungstechniken zu verstehen.

Vorfluter

Wird in ein Fließgewässer Abwasser eingeleitet, wird das Gewässer in der Fachsprache als Vorfluter bezeichnet.

Abwasser

Abwasser ist das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser).

Schmutzwasser

Als Schmutzwasser werden i.d.R. Haushaltsabwasser und Industrieabwasser bezeichnet. Gemäß DIN 4045 ist Schmutzwasser ein durch Gebrauch verändertes und in ein Entwässerungssystem eingeleitetes Wasser.

Fremdwasser

In die Kanalisation eindringendes oder gelegentlich eingeleitetes Grundwasser sowie über Fehlanlüsse eingeleitetes Wasser.

gewerbliches Schmutzwasser

Schmutzwasser aus Gewerbebetrieben (z.B. Wäschereien, Friseurläden etc.).

industrielles Schmutzwasser

Schmutzwasser aus Industriebetrieben (z.B. Brauerei, chemische Fabrik etc.).

häusliches Schmutzwasser

Schmutzwasser aus Küchen, Waschräumen, Toiletten und ähnlich genutzten Räumen.

kommunales Schmutzwasser

Abwasser aus geschlossenen Siedlungsgebieten. Es ent-

Glossar

Absorption

Verfahrenstechnische Bezeichnung für die selektive Aufnahme einzelner Gase oder Dämpfe aus einem Gasgemisch in einer Waschflüssigkeit.

Adsorption

Verfahrenstechnische Bezeichnung für die selektive Aufnahme einzelner Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten aus einem Gemisch durch Anlagern der betreffenden Stoffe an der Oberfläche eines Festkörpers.

Altlasten

Geht von einem Altstandort (ehemalige Fabrik, Deponie o. ä.) eine Gefahr für die Gesundheit aus, so wird dieser Standort als Altlast bezeichnet. Durch geeignete Maßnahmen (Sicherung und/oder Sanierung) ist eine Unterbrechung bzw. Beseitigung der Gefährdungspfade (Grundwasser, Bodenluft, Boden) zu bewirken.

Anlage

(Komplex) Zusammengesetztes System aus Einzelkomponenten mit unterschiedlichen Einzelfunktionen, die im Zusammenwirken einen Gesamtprozeß ermöglichen (z.B. Produktionsanlage, Fabrik, Kläranlage, Stereo-Anlage)

Biogas

Bei der anaeroben Stoffwandlung durch Mikroorganismen kann unter entsprechenden Randbedingungen methanhaltiges (energiereiches) Gas entstehen. Neben dem Sauerstoffmangel und dem Vorhandensein von Mikroorganismen, die Essigsäure erzeugen, müssen methanogene Bakterien unter pH-neutralen Bedingungen (pH 6,8 – 7,2) Methan erzeugen. Bei ausreichenden CH₄-Konzentrationen (60 – 80 % kann das Gas direkt zur Wärme- und/oder Elektroenergieversorgung verwendet oder dem Gasversorger angedient werden.

Biomasse

Bei allen Prozessen in der Umwelt, bei der biologische Systeme sich in der Anzahl der Zellen bzw. in der Größe der Zellen vermehren, entsteht Biomasse. Die Pflanzen und phototrophen Mikroorganismen nutzen das CO₂ der Luft und anorganische Nährstoffe aus Boden oder Wasser, um mit Hilfe der Sonnenenergie (Lichtenergie) Biomasse aufzubauen (autotroph). Viele Organismen, Tiere und die meisten Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) wandeln organische Stoffe durch Oxidation (aerob) oder Reduktion (anaerob) in Energie und nutzen diese zum Aufbau zelleigener Verbindungen, um sich zu vermehren oder zu vergrößern.

Emission

Die von einer Anlage ausgehenden Schadstoffe/ Luftverunreinigungen/ Schall/ Strahlung.

End-of-pipe

Die Behandlung von „Abströmen“ vorwiegend aus großtechnischen Produktionsprozessen in der Regel nach Zusammenführung aller Emissionsquellen, wird das End-of-pipe verstanden. Im Gegensatz dazu sind integrative Entsorgungstechniken zu verstehen.

Energiewandlung

Umwandlung vorhandener Energie (Primärenergie) in eine technisch umsetzbare Form (Sekundärenergie), in der Regel mechanische, elektrische oder Wärmeenergie.

Erneuerbare Energien

Als erneuerbare Energiequelle bezeichnet man Energiequellen, die sich kontinuierlich auf natürliche Weise erneuern. (Einstrahlung der Sonne, Gezeitenenergie, Geothermie)

Immission

Auf Menschen, Tiere, Pflanzen oder Gegenstände einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.

Katalysator

Hilfsstoff, der chemische Reaktionen beschleunigt oder erst ermöglicht, ohne selbst an der Reaktion teilzunehmen. Die Wirkungsweise von Katalysatoren wird durch die Bildung aktiver Zwischenprodukte möglich. Meist wird die aktive Schicht durch Edelmetalle gebildet (Platin, Palladium u. a.), die auf einem porösen Trägermaterial in dünner Schichtstärke aufgebracht sind.

Kondensation

Verfahrenstechnische Bezeichnung für die Verflüssigung von Wasserdampf oder anderen Dämpfen durch Erhöhung des Drucks bei konstanter Temperatur bzw. Abkühlung bei gleichbleibendem Druck.

Kraft – Wärme - Kopplung

Nutzung der Abwärme aus der Stromerzeugung in Kraftwerken.

Kreislaufprozesse

In der Natur unterliegen viele Elemente einem Stoffwandlungsprozess, der in einem geschlossenen Kreis abläuft. So werden durch Fixierung von N_2 aus der Luft durch Bakterien biologisch gut verfügbare Ammoniumverbindungen erzeugt. Ammoniumverbindungen sind durch Nitrifikation (Wandlung in NO_3 -Verbindungen) und Denitrifikation (Wandlung in N_2) wieder in die Umgebung als Ausgangsstoff zurück zu geben. Auch Kohlenstoff unterliegt einem geschlossenen Umwandlungsprozess. Vorwiegend Pflanzen fixieren das CO_2 der Luft, bilden Zucker und daraus hochpolymere Verbindungen, die ihrerseits wieder durch Tiere und Mikroorganismen (Ver-

Beispielfragen (Engelke)

Was bedeutet der Messwert BSB₅ und welche Rolle spielt dabei der Index 5?

Worin unterscheiden sich CSB und BSB und was bedeutet das CSB/BSB- Verhältnis?

Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Sauerstoffgehalt und der Gewässergüteklasse?

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Stickstoff- und Phosphatbelastung und der Eutrophierung von Gewässern?

Was bedeutet „Einwohnerwert“ und „Einwohnergleichwert“ und welche Rolle spielen sie bei der Auslegung von Kläranlagen?

Welche Beziehungen bestehen zwischen Direkteinleiter bzw. Indirekteinleiter zur Kläranlage und zur Vorflut?

Welche Eigenschaften müssen Stoffe besitzen, die in der mechanischen Reinigungsstufe einer Kläranlage rückgehalten werden können?

Für welche biologischen Prozesse wird im Abwasser Sauerstoff benötigt, bei welchen ist Sauerstoff schädlich?

Welche wesentlichen Unterschiede existieren zwischen Tauchkörper- und Belebungsverfahren?

Wie werden Vorklärbecken dimensioniert? Was ist bei der Gestaltung zu berücksichtigen?